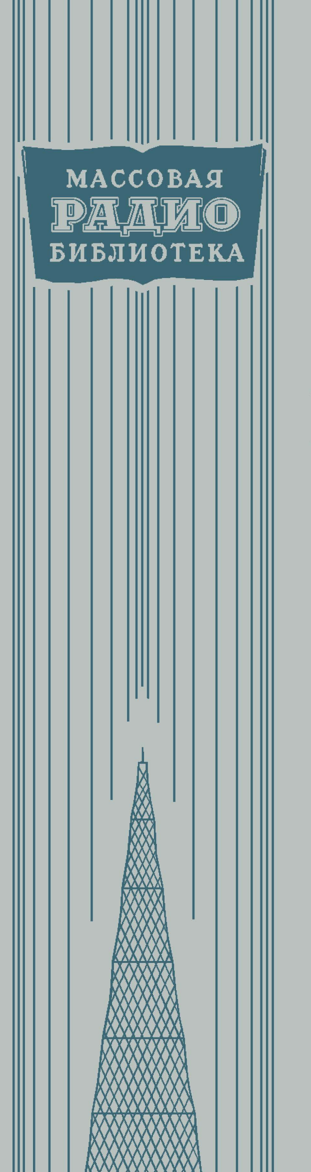
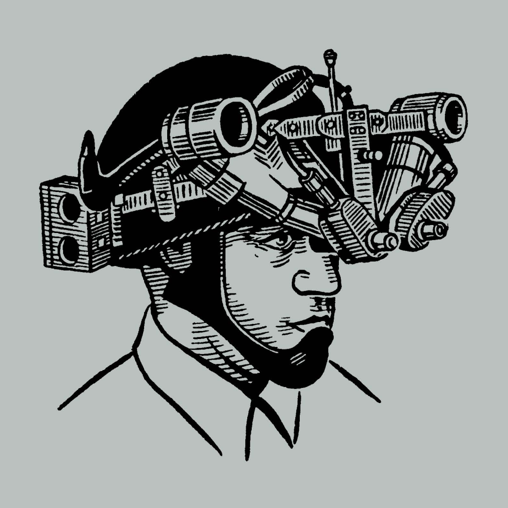


И. Б. ЛЕВИТИН

ТЕХНИКА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ





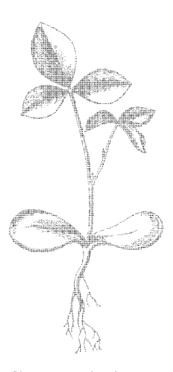
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 350

И. Б. ЛЕВИТИН

ТЕХНИКА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

Книга знакомит радиолюбителей с основами техники инфракрасных излучений, имеющей в настоящее время разнообразные применения в науке, народном хозяйстве, военном деле и т. д. В ней приводятся краткие сведения о природе инфракрасных излучений, их свойствах, способах генерирования и приема, а также об основных применениях в различных отраслях науки и техники.

Техника инфракрасных лучей теснейшим образом связана с радиоэлектроникой и использует ее различные достижения. Поэтому радиолюбитель, знакомый с основами радиоэлектроники, прочитав эту книгу, увидит еще одно направление использования радиоэлектроники, все время совершенствующееся и развивающееся.

Левитин Исидор Борисович

ТЕХНИКА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Редактор *Ф. И. Тарасов* Техн. редактор *П. М. Асанов*

Сдано в набор 28/V 1959 г. Подписано к печати 5/IX 1959 г.
Т-10206 Бумага 84×108¹/₃₂ 4,1 печ. л. Уч.-изд. л. 4,6
Тираж 35 000 экз. Цена 1 р. 85 к. Заказ 312

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФРАКРАСНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Еще в 1666 г. знаменитый английский физик Исаак Ньютон показал, что солнечный свет, разложенный с помощью стеклянной призмы, образует спектр из лучей различных цветов — от фиолетового до красного. Однако до начала прошлого столетия никто не предполагал, что солнечный свет, помимо видимых, содержит также невидимые лучи.

Этот факт установил в 1800 г. выдающийся английский ученый Вильям Гершель. Открытые Гершелем невидимые излучения получили название инфракрасных излучений или инфракрасных лучей (в специальной литературе используются как тот, так и другой термины [1]).

Вслед за открытием Гершеля многие исследователи в XIX в. изучали свойства инфракрасных излучений. Было доказано, что отражение и преломление инфракрасных излучений происходит точно так же, как и видимых. Было также установлено, что стекло пропускает не все инфракрасные излучения и что более прозрачными для них являются некоторые другие материалы (например, каменная соль).

В 1853 г. выдающийся французский физик Андре-Мари Ампер высказал предположение об одинаковой природе световых и инфракрасных излучений. Понадобилось, однако, время и труды многих исследователей, в том числе русских ученых, чтобы исчерпывающе доказать единство природы всех видов электромагнитных колебаний, одним из которых являются инфракрасные лучи. Было доказано, что

---

[1] Следует отметить, что встречающееся иногда в литературе (главным образом популярной) обозначение этих лучей термином „тепловые лучи“ совершенно неоправдан и не должен применяться, так как в настоящее время хорошо известно, что любые излучения, будучи поглощенными, создают тепловой эффект.

только частота (или длина волны) колебаний определяет отличительные физические особенности различных электромагнитных излучений.

По поводу инфракрасных излучений было достоверно известно, что занимаемая ими спектральная область граничит со стороны коротких длин волн с видимыми излучениями. Граница же длинноволновых инфракрасных излучений (приблизительно 340 *мк*) [1] долгое время оставалась неизвестной. По мере совершенствования методов и средств исследований эта граница отодвигалась все далее и далее, пока блестящие работы советского физика А. А. Глаголевой-Аркадьевой в 1924 г. не сомкнули ее с ультракоротковолновыми радиоизлучениями. Получив с помощью так называемого массового излучателя колебания с длиной волны $\lambda = 125$ *мк*, А. А. Глаголева-Аркадьева показала, что одни и те же излучения можно создать как радиотехническими, так и оптическими методами.

Несмотря на то, что соединение области радиоколебаний и инфракрасных излучений экспериментально было достигнуто, свойства излучений в далекой инфракрасной области спектра практически неизвестны до настоящего времени. Науке предстоит сделать многое, чтобы исследовать и практически использовать эту область электромагнитных колебаний.

Из всей обширной области инфракрасных излучений в технике в настоящее время используется диапазон от 0,76 до 12 *мк* (приблизительно).

Физическая сущность инфракрасных излучений состоит в том, что они испускаются в результате вращательных и колебательных движений молекул тел (твердых, жидких и газообразных). Эти колебательные процессы вызываются, как известно, нагреванием тел. Движение молекул может прекратиться только при абсолютном нуле (—273° C или 0° K). При этой температуре ни одно тело не испускает инфракрасных излучений. При всякой иной температуре выше 0° K все тела являются источниками инфракрасных излучений.

Основные свойства инфракрасных излучений сводятся к следующему.

---

[1] Напомним, что для измерения длин волн сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний оптической области спектра используются следующие единицы: 1 микрон (*мк*) $= 10^{-6}$ *м*; 1 ангстрем (Å) $= 10^{-10}$ *м* $= 10^{-4}$ *мк*.

1. Инфракрасные излучения невидимы, и это свойство определяет их многие практические применения (технические, биологические, военные и т. д.).

2. При прохождении сквозь толщу атмосферы инфракрасные излучения с различной длиной волны поглощаются не одинаковым образом (для некоторых инфракрасных излучений, например с длиной волны 2,7—3,2 и 5—7 *мк*, атмосфера практически совершенно непрозрачна); в целом же инфракрасные излучения ослабляются в меньшей мере, чем видимые излучения. Это преимущество весьма ощутимо не только в прозрачной, но также в замутненной атмосфере (при воздушной дымке или слабом тумане), однако оно практически не сказывается при густом тумане.

3. Инфракрасные излучения легко генерируются; простейший способ их получения — нагревание тела. Кроме тепловых излучателей, в настоящее время существуют более совершенные источники инфракрасных излучений, например импульсные газоразрядные лампы. Однако в подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело с тепловыми источниками инфракрасных излучений.

4. Инфракрасные излучения воспринимаются разнообразными приемниками — тепловыми, фотоэлектрическими, фотолюминесцентными и т. д., и в этом смысле они очень универсальны.

Важно отметить, что современные средства дают возможность выделять желательные диапазоны инфракрасных излучений. Для этого используются фильтры разного рода (поглощающие, рассеивающие, интерференционные, поляризационные), и это позволяет использовать инфракрасные излучения в практических целях с наибольшей эффективностью.

СПОСОБЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Говоря об источниках инфракрасных излучений, надо провести разграничение между природными источниками (в качестве которых надо рассматривать все окружающие нас тела, атмосферу и т. д.) и искусственными источниками, создаваемыми специально для генерирования инфракрасных излучений в тех или иных практических и технических целях.

Как уже говорилось выше, простейшим способом получения инфракрасных излучений служит нагревание тел; закономерности излучения нагретых тел лежат в основе рас-

чета тепловых излучателей (например, ламп накаливания, электрических дуг, силитовых стержней и т. д.). Для понимания этих закономерностей важно иметь представление об абсолютно черном теле и его излучении.

АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО

Абсолютно черным телом называется тело, полностью поглощающее все падающие на него излучения независимо от их длины волны, направления и состояния поляризации. Можно осуществить модель абсолютно черного тела, являющегося, строго говоря, абстрактным понятием, в виде полого шара (или полого тела иной формы), имеющего в стенке маленькое отверстие, изготовленного из любого материала, не пропускающего излучения (рис. 1). Излучение, попавшее через отверстие внутрь шара, претерпевая многократные отражения от внутренней поверхности и теряя каждый раз часть энергии, практически полностью поглотится. Иными словами, поглощательная способность абсолютно черного тела $\alpha_{\lambda T_{черн}}$ (значки λ и T обозначают соответственно длину волны излучения и абсолютную температуру тела) всегда равна единице. Нагревая полый шар или тело иной формы, в котором сделано отверстие, до некоторой абсолютной температуры T, мы превращаем отверстие в идеальный излучатель, свойства которого определяются законами абсолютно черного тела.

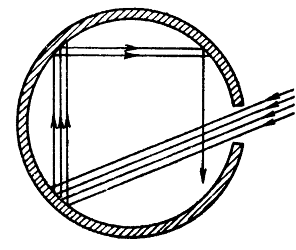


Рис. 1. Модель абсолютно черного тела.

Основным из законов излучения абсолютно черного тела является закон Кирхгофа: отношение излучательной способности тела $r_{\lambda T}$ к его поглощательной способности $\alpha_{\lambda T}$ при данной температуре T и данной длине волны λ является для всех без исключения тел одинаковым и равным излучательной способности абсолютно черного тела при тех же длине волны и температуре.

Из этого закона вытекает важное следствие:

$$r_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \, r_{\lambda T_{черн}},$$

показывающее, что излучательная способность любого тела равна произведению его поглощательной способности на излучательную способность абсолютно черного тела

для тех же λ и T. Так как для абсолютно черного тела $\alpha_{\lambda T \text{ черн}} = 1$, то ясно, что оно является самым лучшим излучателем. Очевидно также, что знание законов излучения абсолютно черного тела дает возможность рассчитать излучение любого тела, если известна его поглощательная способность (или интегральный коэффициент излучения).

Закон Стефана-Больцмана устанавливает связь между энергетической светимостью $R^*_{\text{черн}}$ абсолютно черного тела и его температурой T

$$R_{\text{черн}} = \sigma T^4 \ [\mathit{вт} \cdot \mathit{см}^{-2}].$$

Здесь постоянная $\sigma = 5{,}672 \cdot 10^{-12}$ $\mathit{вт} \cdot \mathit{см}^{-2} \cdot \mathit{град}^{-4}$.

Эта формула показывает, что увеличение температуры приводит к очень резкому увеличению излучения абсолютно черного тела, поскольку температура входит в нее в четвертой степени.

Закон Вина-Голицына определяет длину волны $\lambda_{\text{макс}}$, соответствующую наиболее интенсивному излучению абсолютно черного тела при данной температуре T:

$$\lambda_{\text{макс}} T = \text{const} = 2\,886 \ \mathit{мк} \cdot \mathit{град}.$$

Этот закон называют также «законом смещения» в связи с тем, что увеличение температуры T приводит к смещению $\lambda_{\text{макс}}$ в коротковолновую, а уменьшение температуры — в длинноволновую сторону спектра.

Наконец, формула Планка описывает закономерность распределения излучения в спектре абсолютно черного тела при каждой заданой температуре T:

$$r_{\lambda T_{\text{черн}}} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1\right)} \ [\mathit{вт} \cdot \mathit{см}^2 \cdot \mathit{мк}^{-1}].$$

В этой формуле постоянные $c_1 = 3{,}74 \cdot 10^4$ $\mathit{вт} \cdot \mathit{см}^{-2} \cdot \mathit{мк}^4$; $c_2 = 14\,380$ $\mathit{мк} \cdot \mathit{град}$; e — основание натуральных логарифмов.

Кривые, выражающие зависимость $r_{\lambda T \text{ черн}}$ (излучательной способности или спектральной энергетической светимости) от λ при различных T показаны на рис. 2. График построен в двойном логарифмическом масштабе и в косо-

* Энергетическая светимость R — поток, излучаемый с единицы поверхности (имеет размерность $\mathit{вт} \cdot \mathit{см}^{-2}$).

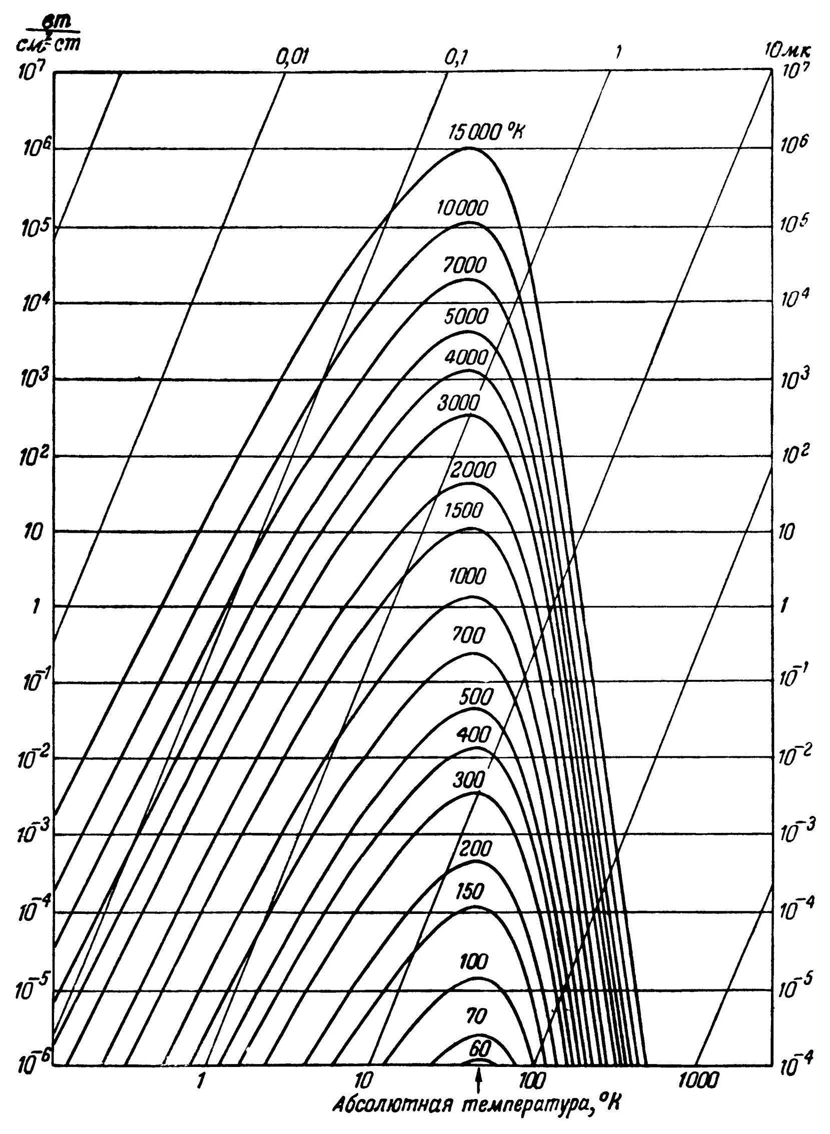


Рис. 2. Изотермы Планка для абсолютно черного тела.

угольных координатах, причем каждая кривая получается из предыдущей путем параллельного перемещения ее вдоль прямой, соединяющей максимумы этих кривых. Площадь, заключенная между каждой кривой и осью абсцисс, выражает энергетическую светимость $R_{черн}$ абсолютно черного тела при данной температуре.

ИЗЛУЧЕНИЕ НЕЧЕРНЫХ ТЕЛ

Идеального по свойствам абсолютно черного тела в действительности не существует, а на практике приходится иметь дело с излучением реальных тел, свойства которых в той или иной мере отличаются от свойств абсолютно черного тела. Такие тела называются нечерными телами. Все они могут быть разделены на два основных класса. Один из них характерен тем, что относящиеся к нему тела имеют характер распределения излучения по спектру, совершенно подобный абсолютно черному телу, но для каждой длины волны излучение данного тела меньше, чем у черного тела, при любой температуре. Эта группа тел называется серыми телами.

Излучательные свойства серого тела оцениваются его интегральным коэффициентом излучения ε_T (или степенью черноты), который представляет собою отношение энергетической светимости данного тела к энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\varepsilon_T = \frac{R_T}{R_{T_{черн}}}.$$

Интегральный коэффициент излучения ε_T зависит от физических свойств тела, состояния его поверхности и т. д. Для разных материалов он различен: например, для алюминия ε_T — от 0,04 (полированная поверхность) до 0,05 (окисленная поверхность), для окисленного железа 0,78—0,82, для воды 0,98, для стекла 0,94, для масляных красок любого цвета 0,92—0,96, для алюминиевой краски 0,35 и т. д.

Зная интегральный коэффициент излучения ε_T для данного тела, можно рассчитать энергетическую светимость любого серого тела по формуле, схожей с законом Стефана-Больцмана,

$$R_T = \varepsilon_T \sigma T^4 \; [вт \cdot см^{-2}]$$

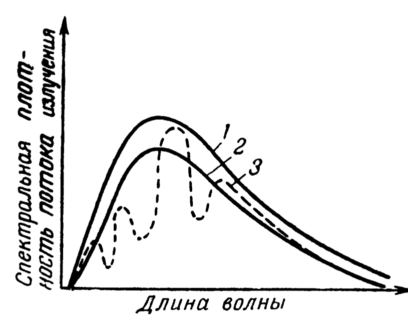


Рис. 3. Спектральное распределение излучения абсолютно черного тела, серого тела и селективного излучателя для одной и той же температуры.

1 — абсолютно черное тело; 2 — серое тело; 3 — селективный излучатель.

и, следовательно, определить, если нужно, поток излучения с поверхности этого тела.

Излучатели, относящиеся ко второму классу нечерных тел, называются селективными (избирательными) излучателями. Такие тела излучают не равномерно в различных участках спектра (в некоторых сильнее, а в других слабее). Таким образом, спектральное распределение излучения таких тел (к числу которых относятся многие металлы и в особенности окислы металлов и другие соединения) имеет кривую с явно выраженными максимумами и минимумами.

На рис. 3 показан характер спектрального распределения излучения абсолютно черного тела, серого тела и селективного излучателя для некоторой температуры.

ВИДЫ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Используемые на практике источники инфракрасных излучений весьма разнообразны. К ним относятся: 1) температурные источники, генерирующие инфракрасные излучения в результате нагревания тела (например, электрические лампы накаливания, силитовый излучатель и т. п.); 2) газоразрядные источники, генерирующие инфракрасные излучения вследствие явления люминесценции, возникающей при прохождении электрического тока через газ или пары металла (например, цезиевые газосветные лампы, ртутные газосветные лампы низкого давления и т. д.); 3) источники смешанного характера, в которых происходит одновременно и температурное излучение, и люминесценция (например, ртутные газосветные лампы высокого давления, электрические дуговые лампы и т. п.).

Этой классификацией отнюдь не ограничивается перечень источников инфракрасных излучений; кроме того, мы не рассматриваем здесь вовсе природные излучатели (толщу атмосферы, море и т. д.) и такие мощные излучатели, как корабли и самолеты.

Приведем некоторые сведения, относящиеся к наиболее часто используемым источникам инфракрасных излучений.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Любая лампа накаливания, в которой излучателем служит нить из вольфрама, создает значительное инфракрасное излучение. Максимальное излучение пустотной лампы накаливания при температуре нити $T=2\,500°$ K соответствует $\lambda=1{,}16$ *мк*, а газополной лампы накаливания при температуре нити $T=3\,000°$ K соответствует $\lambda=0{,}96$ *мк*.

В табл. 1 приводятся данные о распределении энергии излучения в процентах для различных типов ламп накаливания.

Таблица 1

Распределение энергии излучения для различных типов ламп накаливания

Распределение энергии, %	Пустотная лампа	Лампа, наполненная аргоном	Биспиральная лампа, наполненная аргоном	Лампа, наполненная криптоном и ксеноном
Видимое излучение	7	10	12	13
Невидимое излучение	86	68	74	76
Потери в держателях	7	3	2	2
Потери в газе	0	19	12	9
Общая рассеянная энергия	100	100	100	100

Нормальные осветительные лампы накаливания выпускаются отечественной промышленностью по основному стандарту 46 различных мощностей и размеров со световым потоком от 70 до 19 500 *лм*.

Кроме них, наша промышленность выпускает большое количество разнообразных типов ламп как общего назначения (для местного освещения марки МО, криптоновых марки БК, зеркальных марки ЗН и т. п.), так и специальных (прожекторных мощностью до 10 000 *вт* со световым пото-

ком 280 000 *лм*, кинопроекционных, рудничных, сигнальных и т. д.).

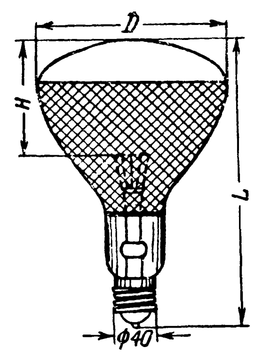


Рис. 4. Лампа накаливания — термоизлучатель.

Для техники инфракрасных излучений особый интерес представляют лампы накаливания—термоизлучатели марки ЗС, предназначенные для инфракрасной сушки различных изделий и материалов. Такая лампа показана на рис. 4. Ее колба параболоидной формы алюминирована внутри. Лампа ЗС является одновременно прибором, концентрирующим и направляющим поток излучения в нужном направлении. В табл. 2 приводятся данные о лампах этого типа.

Таблица 2

Данные ламп накаливания — термоизлучателей

Обозначение	Номинальные электрические параметры		Основные размеры, *мм*			Средняя продолжительность горения, *ч*
	Напряжение, *в*	Мощность, *вт*	*D*	*L*	*H*	
ЗС-2	127	250	180	267	108	2 000
ЗС-1	127	500	180	267	108	2 000
ЗС-3	220	500	180	267	108	2 000

СИЛИТОВЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Силитовый излучатель широко используется в лабораторной практике (в инфракрасной спектроскопии и т. п.). Он представляет собою стержень из карбида кремния, смешанного с глиной и подвергнутого обжигу. Такой стержень, обладающий высоким сопротивлением, накаливается электрическим током (к концам прикладывается напряжение порядка 100 *в*) до рабочей температуры 980—1 100° С. Размеры стержней: диаметр 8 *мм*—5 *см* и длина 25—100 *см*.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДУГОВЫЕ ЛАМПЫ

Электрическая дуговая лампа является первым электрическим источником света (открыта в 1802 г. В. В. Петровым), однако с успехом используемым и в настоящее

время. Простая угольная дуговая лампа, основным излучателем в которой является кратер положительного угля (излучает около 85% светового потока, имея температуру порядка 4 200° К), дает основную часть излучения в области $\lambda=0{,}7-0{,}8$ *мк*. Таким образом, простая дуговая лампа является интенсивным источником коротковолновых инфракрасных излучений.

Дуговая лампа высокой интенсивности получается между угольными электродами (положительный электрод имеет фитиль из сажи или графита, пропитанный солями щелочноземельных металлов — церия, лантана, самария). В интенсивной дуге светится не только поверхность кратера, но и облако раскаленных газов, прижимаемых к кратеру катодным потоком.

Плотность тока дуги высокой интенсивности значительно выше, чем у простой дуги, а температура кратера доходит до 5 000° К. В инфракрасной области спектра оба типа электрических дуговых ламп приблизительно равноценны.

ЦИРКОНИЕВАЯ ДУГОВАЯ ЛАМПА

Эта лампа является источником инфракрасных излучений, в котором дуга образуется в атмосфере смеси паров циркония и аргона при нормальном давлении. Электродами служат танталовая трубка, наполненная окисью циркония, и кольцо из графита. При дуговом разряде образуется очень яркое пятно на цирконии, восстановленном из расплавившейся окиси, вблизи образуется облако паров циркония и ионизированного аргона.

Лампа дает непрерывный спектр 0,25—5 *мк* с максимумом излучения ~ 1 *мк*. На это излучение накладывается серия интенсивных линий излучения паров циркония и аргона.

ЦЕЗИЕВАЯ ЛАМПА

Цезиевая лампа представляет собою газосветную лампу, в которой происходит разряд между двумя оксидированными вольфрамовыми электродами в атмосфере паров цезия и аргона. Эта лампа, дающая почти непрерывное излучение в видимой области спектра, имеет резкие максимумы излучения в ближней инфракрасной области при $\lambda=0{,}86$ и 0,89 *мк*.

Цезиевые лампы выпускаются мощностью 50, 100 и 500 *вт*. Эти лампы позволяют осуществить глубокую мо-

дуляцию тока через лампу. В диапазоне звуковых частот глубина модуляции достигает 90%, при $f=10\,000$ *гц*—составляет 60—70%.

КРИПТОНО-КСЕНОНОВЫЕ ГАЗОСВЕТНЫЕ ЛАМПЫ СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Работа этих ламп основана на электрическом разряде в атмосфере ксенона и криптона, наполняющей теплоупорный баллон из плавленого кварца при давлении 30—40 *атм*. Общий вид лампы показан на рис. 5.

Особенности этих ламп состоят в том, что их излучение создает сплошной спектр, близкий по распределению

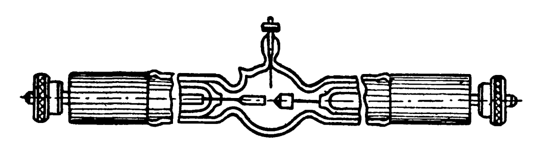


Рис. 5. Криптоно-ксеноновая лампа ГСВД.

энергии к спектру излучения абсолютно черного тела при $T=5\,200—5\,700°$ K. В инфракрасной области спектра на сплошном фоне имеются интенсивные максимумы излучения при 0,76; 0,82; 0,84; 0,9 и 1 *мк*. Плотность тока в разряде при мощности лампы до 750 *вт* достигает 500 *а/см*^{2}.

Криптоно-ксеноновые лампы сверхвысокого давления являются мощными источниками коротковолновых инфракрасных излучений. Их срок службы составляет ~100 *ч*.

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАМПЫ

Этот тип газосветных ламп представляет собой наиболее интенсивный источник световых и, в особенности, инфракрасных коротковолновых излучений. Импульсные лампы создают излучение с мгновенной интенсивностью, на несколько порядков более высокой, чем у самых мощных источников постоянного излучения. При этом они питаются от источников энергии со сравнительно небольшой средней мощностью.

Импульсные лампы создают мгновенные мощные вспышки, получаемые при разряде конденсатора большой емкости и достаточного напряжения на промежуток между электродами лампы. При этом между электродами выделяется в очень короткий промежуток времени (порядка

10^{-3} *сек* и менее) значительная энергия, вызывающая бурную ионизацию и свечение газа. В момент вспышки ток в импульсной лампе достигает нескольких сот и даже тысяч ампер.

Все отечественные импульсные лампы (рис. 6) наполняются ксеноном при давлении 60—250 *мм рт. ст.* Конструктивно они представляют собой трехэлектродные газо-

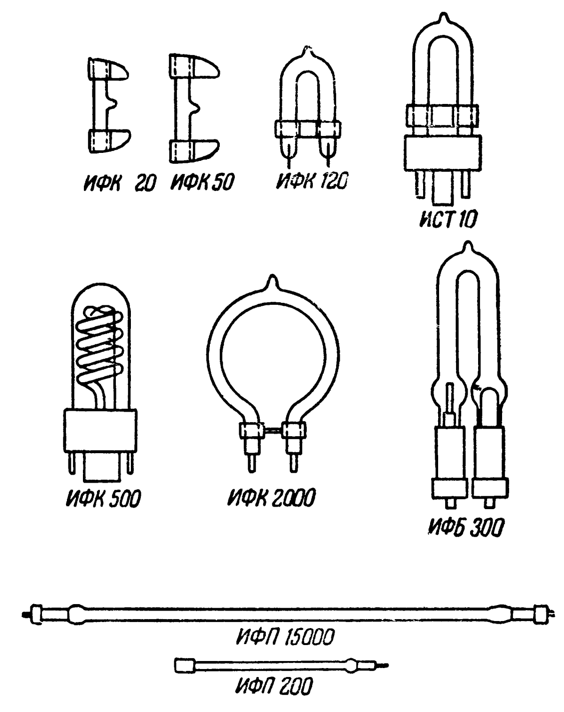


Рис. 6. Типы импульсных ламп.

разрядные приборы (с анодом, катодом и зажигательным электродом в виде металлической полоски или спирали, накладываемой на лампу снаружи).

В настоящее время отечественная промышленность выпускает серийно 12 типов импульсных ламп, данные которых приведены в табл. 3. Спектральное распределение энергии излучения характеризуется, так же как и у ламп сверхвысокого давления, наличием резких максимумов в ближней инфракрасной области спектра.

Таблица 3

Основные данные отечественных импульсных ламп

Тип лампы	Номинальный режим питания					Ориентировочное сопротивление лампы, *ом*	Напряжение зажигания, *в*	Напряжение самопробоя, *в*	Наименьшая световая энергия, *лм·сек*	Ориентировочная длительность вспышки в номинальном режиме на уровне 35% максимальной силы света, *мсек*	Срок службы в номинальном режиме, тысячи вспышек
	Энергия вспышки, *дж*	Рабочее напряжение, *в*	Емкость питающего конденсатора, *мкф*	Средняя мощность, *вт*	Минимальный интервал между вспышками в номинальном режиме, *сек*						
ИФК-20	20	130	2 500	2	10	0,16	100	700	200	0,2	10
ИФК-50	50	200	2 500	5	10	0,32	140	1 000	700	0,4	10
ИФК-120	120	300	2 500	12	10	0,7	180	1 000	2 500	1,2	10
ИФК-500	500	500	4 000	30	15	4	400	3 500	10 000	8	10
ИФК-2000	2 000	500	16 000	300	15	0,45	250	2 000	60 000	4	5
ИФБ-300	300	300	6 500	40	7,5	2,5	240	1 500	5 000	8	10
ИФП-200	200	500	1 600	27	7,5	2	450	2 000	3 500	1,6	3
ИФП-500	500	500	4 000	65	7,5	3,5	450	3 000	12 000	7	3
ИФП-1500	1 500	1 000	3 000	100	15	6	900	4 000	35 000	9	3
ИФП-4000	4 000	1 400	4 000	270	15	8	1 300	5 000	120 000	16	3
ИФП-15000	15 000	2 400	5 000	1 250	12	1,8	1 600	5 000	500 000	4,5	10
ИСТ-10	0,01	500	0,08	10	0,001	1	180	1 000	Средняя сила света 1 *св*	0,007	20 *ч*

Импульсные лампы применяются либо в режиме редко повторяющихся вспышек с очень большой энергией излучения в каждой (например, в фотографии), либо в режиме вспышек, повторяющихся с достаточно большой частотой (например, в стробоскопии, кинематографии и т. п.).

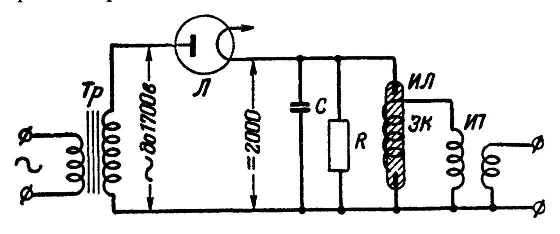


Рис. 7. Простейшая схема включения импульсной лампы.

Тр — повышающий трансформатор; *Л* — кенотрон; *С* — высоковольтный конденсатор; *R* — вспомогательное нагрузочное сопротивление; *ИЛ* — импульсная лампа, *ИТ* — импульсный трансформатор; *ЗК* — запускающая катушка.

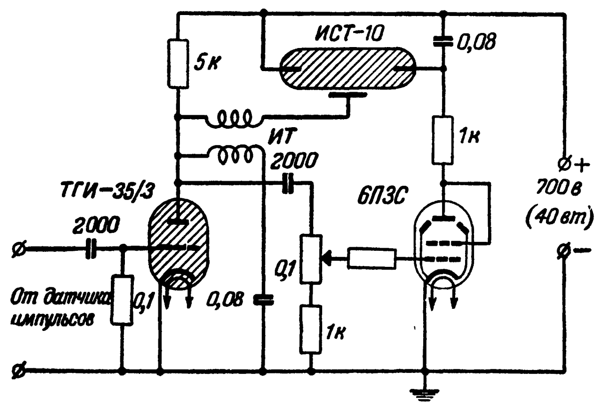


Рис. 8. Схема включения импульсной лампы ИСТ-10 в стробоскопическом режиме.

При использовании импульсной лампы любого типа необходимо получить высокое напряжение постоянного тока для зарядки конденсатора. Для этого в схему вводится повышающий трансформатор и выпрямитель. Простейшая принципиальная схема питания импульсной лампы показана на рис. 7.

Лампа зажигается запускающим высоковольтным импульсом порядка 10—15 *кв,* получаемым от маленького им-

пульсного трансформатора, через зажигательный электрод наложенный на лампу. Этот импульс ионизирует газ в лампе, после чего накопительный конденсатор разряжается на лампу, создавая мощную вспышку.

На рис. 8 показана схема включения лампы ИСТ-10, которая создает короткие временные интервалы между вспышками. До частоты вспышек 100—200 *гц* лампы могут работать в простейших схемах. При частых вспышках (в стробоскопическом режиме) средняя сила света лампы резко снижается вследствие уменьшения емкости питающего конденсатора.

ПРИЕМНИКИ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Аппаратура, работа которой основана на использовании инфракрасных излучений, всегда имеет основную часть— приемник излучений, представляющий собою устройство, воспринимающее лучистую энергию и превращающее ее в другие виды энергии (тепловую, электрическую и др.). В целом ряде случаев в приемнике происходит не одно, а несколько превращений энергии—одновременных или последовательных.

В фотоэлементах поглощенная лучистая энергия превращается одновременно и в электрическую энергию (фототок), и в тепловую (нагревание чувствительного элемента). В электронно-оптических преобразователях поглощенная в фотокатоде лучистая энергия сначала вызывает эмиссию электронов, а затем ускоренные приложенным к прибору электрическим полем электроны, бомбардируя люминесцирующий экран, вызывают его свечение. В термоэлементах поглощенная лучистая энергия нагревает термоспай, образуя при этом термо э. д. с.

Свойства и качества приемников лучистой энергии, позволяющие сопоставлять их между собой и выбирать наиболее рациональный приемник для конкретного практического применения, оцениваются с помощью ряда характеристик, важнейшими из которых являются: чувствительность приемника (спектральная, общая и пороговая) и инерция приемника.

Кроме того, в ряде случаев интересуются такими характеристиками приемников как, например, внутреннее сопротивление (в частности, сопротивление в момент облучения и сопротивление при отсутствии облучения—темновое сопротивление). Последние указанные характеристики относятся к тепловым и фотоэлектрическим приемникам.

Спектральной чувствительностью приемника g_λ называется отношение его количественной реакции p_λ (например, величины фототока или термотока в микроамперах) к падающему на приемник однородному потоку излучения Φ (в ваттах):

$$g_\lambda = \frac{p_\lambda}{\Phi_\lambda}.$$

Таким образом, спектральная чувствительность приемника измеряется в *мка/мквт, мкв/мквт* и т. п.

Спектральная чувствительность приемника является очень важной характеристикой, показывающей, как данный приемник реагирует на излучения с различными длинами волн. Надо иметь в виду, что в большинстве случаев приемники лучистой энергии обладают избирательными свойствами, т. е. реагируют на излучения с различными длинами волн по-разному. Исключением в этом смысле являются тепловые приемники (термоэлементы, болометры, пневматические приемники), чувствительные элементы которых обладают свойствами серого тела с весьма большим интегральным коэффициентом излучения (т. е., в первом приближении, свойствами черного тела).

Общей (интегральной) чувствительностью g приемника называется отношение его количественной реакции p к падающему на приемник потоку излучения:

$$g = \frac{p}{\Phi}.$$

Величина g выражается в тех же единицах, что и g_λ (например, в *мка/мквт* и т. д.).

Порогом чувствительности приемника называется наименьший поток излучения $\Phi_п$ (в ваттах), который создает в цепи приемника сигнал, равный по величине уровню его собственных шумов. При этом надо иметь в виду, что уровень собственных шумов (самопроизвольных колебаний электрических величин элементов схемы и соединительных проводов) складывается из: 1) самопроизвольных флуктуаций тока в чувствительном элементе приемника; 2) собственных шумов ламп усилителя; 3) флуктуаций разностей потенциалов на концах сопротивлений, входящих в схему. Значение шумов заключается в том, что фон, создаваемый ими, затрудняет выделение полезного сигнала. Установлено, что на уровне шумов мож-

но различить полезный сигнал, превышающий этот уровень по крайней мере вдвое.

Инерция приемника представляет собою запаздывание его реакции на воздействие излучения. Этот параметр характеризуют временем, в течение которого реакция приемника достигает определенной части (например, 0,5 или 0,63) максимального значения, возможного при воздействии данного значения падающего потока излучения.

Время, в течение которого реакция приемника достигает обусловленной части своего максимального значения, называют постоянной времени приемника.

Инерция приемника лучистой энергии является его важным параметром, по которому судят о возможности использования приемника при модулированном излучении.

Рассмотрим теперь кратко важнейшие виды приемников инфракрасных излучений и их основные характеристики.

ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

Действие термоэлементов основано на хорошо известных явлениях термоэлектричества—возникновении э. д. с. в цепи, состоящей из разнородных металлов, если температуры мест соединений (спаев) этих металлов различаются между собой.

Величина термо-э. д. с. U зависит от рода металлов или сплавов, составляющих цепь, а также от величины разности температур T_1—T_2 более нагретого и менее нагретого спаев:

$$U = A(T_1 - T_2).$$

Здесь A — коэффициент пропорциональности, различный для различных комбинаций металлов и сплавов. При небольших разностях температур $\Delta T = T_1 - T_2$ сохраняется строго линейная зависимость U от ΔT. Линейная зависимость нарушается только при очень больших значениях ΔT.

Основными деталями термоэлементов, применяемых в качестве приемников инфракрасных излучений, являются: 1) чувствительная часть, поглощающая падающее на термоэлемент излучение; 2) вводная часть; 3) стеклянный баллон и защитный кожух.

На рис. 9 показано схематически устройство современного вакуумного термоэлемента. Вакуум в баллоне созда-

ется с целью снижения тепловых потерь чувствительного элемента. В баллоне устраивается окно из материалов, прозрачных для инфракрасных излучений большей длины, чем та, которая ограничивает прозрачность стекла ($\lambda =$ $= 2{,}5$ *мк*). Такими материалами служат обычно сильвин или флуорит.

Приемная площадка термоэлемента, припаянная к термоспаю (иногда ею служит плоскость самого термоспая), изготовляется обычно из тонкой золотой фольги и чернится. В приемной площадке происходит поглощение лучи-

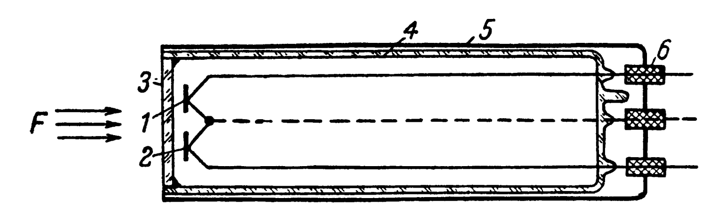


Рис. 9. Схема устройства вакуумного термоэлемента.

1 — рабочий термоэлемент; *2* — компенсационный термоэлемент; *3* — окно, *4* — стеклянный баллон с созданным в нем вакуумом; *5* — металлический кожух; *6* — изоляторы.

стой энергии и превращение ее в тепловую энергию, а в присоединенном к приемной площадке термоспае — превращение тепловой энергии в электрическую.

Термоэлемент является неизбирательным приемником инфракрасных лучей. Общая чувствительность современного термоэлемента, изготовленного из висмута и сплава висмута с 5% олова, с приемной площадкой из золотой фольги 2×2 *мм* составляет примерно $g = 2$ *мкв/мквт* при постоянной времени $\sim 0{,}25$ *сек* и сопротивления ~ 3 *ом*.

В целях повышения чувствительности термоэлементы иногда собирают в последовательные группы — т е р м о с т о л б и к и. Опыт показывает, что число последовательно соединенных спаев невыгодно делать более шести—восьми. Суммарная чувствительность термостолбиков, работающих в вакууме, составляет 5—100 *мкв/мквт* при постоянной времени 0,005—1 *сек*.

При использовании термоэлементов для приема инфракрасных излучений получаемые термотоки обычно бывают очень малы и требуют усиления. Принципы усиления термотоков и фототоков описываются ниже.

БОЛОМЕТРЫ

Болометр является также неизбирательным приемником излучения, чувствительный элемент которого представляет собой зачерненную поверхность [1], обычно в виде тонкой пленки (иногда нити), сопротивление которой резко изменяется при изменении температуры. Конструктивно болометр чаще всего выполняют в виде двух одинаковых чувствительных элементов, включаемых в плечи мостовой схемы, причем один из этих элементов служит приемником

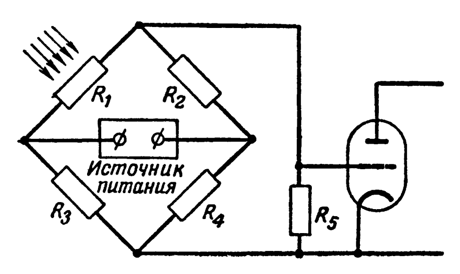


Рис. 10. Мостовая схема включения болометра.

излучения, а второй компенсирует колебания температуры внешней среды (или излучение фона).

Мостовая схема включения болометра показана на рис. 10, где R_1—приемный элемент, R_2—компенсационный элемент, а R_3 и R_4—плечи моста, измерительная диагональ которого включена на вход электронного усилителя. Питание болометрического моста может осуществляться как постоянным током (при этом падающее излучение модулируют с помощью вращающегося диска с отверстиями с частотой 10—20 *гц*), так и переменным током с частотой несколько сот или тысяч герц. Чаще всего для усиления сигналов с болометрического моста используют резонансные усилители, настроенные на частоту модуляции, причем при питании моста постоянным током усиление осуществляется на частоте модуляции, а при питании переменным током

---

[1] Зачернение поверхности есть не что иное, как сообщение ей хороших поглощающих свойств для данного излучения. Поэтому вовсе не обязательно чернение чувствительного элемента в буквальном смысле слова (покрытие копотью, сажей, химическое чернение и т. п.); в видимой области спектра поверхность может, в частности, хорошо отражать, прекрасно поглощая при этом инфракрасные излучения (такими свойствами обладает, например, тонкоизмельченное стекло).

осуществляется сначала первое усиление на частоте питания моста, затем детектирование и после него второе усиление на частоте модуляции.

При изменении сопротивления R_1 чувствительного элемента на величину ΔR_1 вследствие поглощения излучения и нагрева элемента ранее уравновешенный болометрический мост разбалансировывается и на входе усилителя появляется сигнал

$$\Delta V = LI \cdot \Delta R_1,$$

где I — ток через болометр, а L — схемный фактор, зависящий от соотношения сопротивлений плеч моста и входного сопротивления усилителя.

Для равноплечего моста (рис 10) имеем $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ и $L = \frac{1}{2}$ Следовательно:

$$\Delta V = \frac{1}{2} I \cdot \Delta R = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R},$$

где U — напряжение питания болометра.

Материалом для изготовления болометра может быть как проводник (металл), так и диэлектрик или полупроводник. В любом случае необходимо, чтобы этот материал имел возможно больший температурный коэффициент сопротивления α, под которым подразумевается величина

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T}.$$

Общая чувствительность болометра g зависит от размеров приемной поверхности чувствительного элемента q (приблизительно обратно пропорциональна q), причем их произведение g^* остается приблизительно постоянным:

$$g^* = gq \approx \text{const}.$$

Инерция болометра должна обязательно учитываться в связи с выбором частоты модуляции падающего потока излучения.

Порог чувствительности болометра $\Phi_п$ (минимальный поток излучения, обнаруживаемый болометром в данных условиях) зависит от уровня тепловых шумов (вызываемых флуктуациями температуры болометра) и так называемых «токовых» шумов (вызываемых несовершенством контактов, неоднородной структурой материала боломет-

ра и т. п.). При правильном согласовании входа усилителя с сопротивлением болометра, шумы, вносимые усилителем, должны быть значительно меньше шумов болометра. Это условие с успехом достигается при использовании высокоомных полупроводниковых болометров.

Металлические болометры имеют положительный температурный коэффициент сопротивления α, т. е. сопротивление болометра растет с увеличением температуры; значение α при этом невелико. Неудобство в данном случае состоит в том, что при увеличении температуры ток через болометр уменьшается, т. е. уменьшается джоулево тепло, что понижает реакцию болометра на излучение. Однако металлические болометры все же используют ввиду удобства получения тонких приемных площадок путем протяжки, ковки или в последнее время путем нанесения тонких металлических пленок на подложку испарением в вакууме. Для уменьшения тепловых потерь за счет конвекции чувствительные элементы болометра обычно запаивают в стеклянную колбу с вакуумом порядка 10^{-4} *мм рт. ст.* При этом в колбе делается окно из материала, прозрачного для инфракрасного излучения.

Особенно большой интерес в настоящее время представляют полупроводниковые болометры, чувствительным элементом которых служат термисторы—полупроводниковые материалы с высоким отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Чаще всего для этой цели используют оксидные полупроводниковые материалы с электронной проводимостью, состоящие из смеси двух или трех окислов металлов, обработанной специальным образом (например, смеси окислов марганца, никеля и кобальта и т. п.). Сопротивление чувствительных элементов такого рода составляет 0,5—10 *Мом*.

Порог чувствительности $\Phi_п$ полупроводникового болометра составляет величину порядка 10^{-9} *вт,* что соответствует изменению температуры на величину, меньшую миллионной доли градуса.

Чувствительность и инерция болометра изменяются в зависимости от конструктивной формы; так, для болометров с металлической пластиной в тыловой части постоянная времени $\tau \approx 3 \cdot 10^{-2}$ *сек,* а для болометров на кварцевой подложке $\tau \approx 3 \cdot 10^{-3}$ *сек,* т. е. на порядок меньше.

Болометры являются весьма малоинерционными приборами, поэтому их с большим успехом используют для скоростной записи инфракрасных спектров поглощения и

излучения, при исследовании некоторых различных веществ, в некоторых теплопеленгаторах (например, в немецких теплопеленгаторах «Донау-60») и в других целях.

В последнее время в зарубежной лабораторной практике делаются попытки использовать болометры, основанные на сверхпроводимости. Последняя появляется у некоторых металлов при охлаждении их до температуры, близкой к абсолютному нулю. При такой низкой температуре теплоемкость чувствительного элемента исключительно мала, а шумы в нем сводятся практически к нулю. Это позволяет осуществить сверхчувствительный болометр, реагирующий на ничтожные изменения температуры, вызываемые поглощенным в чувствительном элементе излучением.

Однако достижение температуры, близкой к абсолютному нулю, сложно и требует применения жидкого гелия (4° K), который очень трудно получать и хранить. Задача создания сверхпроводящего болометра была практически решена путем использования нитрида колумбия (CbN), сверхпроводимость которого достигается при использовании значительно более удобного метода охлаждения жидким водородом (при температурах между 14,34° и 14,38° K). Такой сверхпроводящий болометр обладает постоянной времени 0,0005 *сек* и имеет порог чувствительности порядка 10^{-11}—10^{-12} *вт*.

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

Фотоэлементы, действие которых основано на внешнем фотоэффекте, представляют собою вакуумные приборы, внутри которых имеется чувствительный фотокатод, наносимый на внутреннюю поверхность колбы, и анод в виде кольца, пластинки и т. д. Между анодом и катодом прикладывается постоянная разность потенциалов порядка 230—240 *в*. При облучении фотокатода в цепи, последовательной с источником тока, появляется ток, направленный от фотокатода к аноду.

Суть явления внешнего фотоэффекта заключается в эмиссии электронов веществом под влиянием поглощенных им квантов излучения. Внешним фотоэффектом управляют два основных закона: 1) закон Столетова—фотоэлектрический ток i прямо пропорционален падающему потоку излучения Φ: $i=k\Phi$, где k — фоточувствительность облучаемого вещества, и 2) закон Эйнштейна—максимальная энергия фотоэлектронов возрастает прямо пропорционально частоте падающего излучения и не зависит от величины падаю-

щего потока излучения: $E_к = h\nu - \varphi$, где $E_к$ — кинетическая энергия электрона, вылетевшего наружу; $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг · сек* — постоянная Планка; ν — частота; φ — работа выхода электрона.

Эмиссия электрона за пределы вещества возможна только в том случае, если энергия кванта излучения $h\nu$ превышает работу выхода; поэтому каждому веществу свойственна вполне определенная граничная длина волны λ_0 («красная» граница фотоэффекта), отличающаяся тем, что излучение с длиной волны, больше λ_0, не может вы-

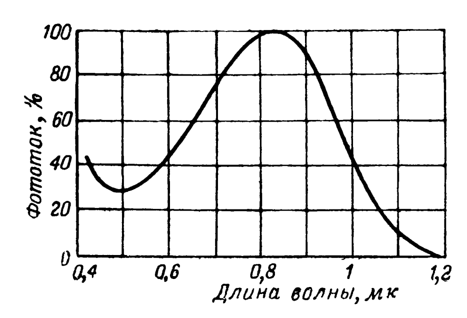


Рис. 11. Спектральная характеристика сложного кислородно-цезиевого фотокатода.

звать эмиссии электронов из этого вещества. Установлено, что окисленные поверхности металлов обладают λ_0, большей, чем у чистых металлов. На этом основано использование в фотоэлементах с внешним фотоэффектом сложных фотокатодов с подложкой из чистого металла, на поверхности которого имеется слой окисла с адсорбированными на нем атомами щелочного металла.

В качестве приемников инфракрасных излучений применяются фотоэлементы с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом, состоящим из нанесенного на стекло баллона слоя серебра, поверх которого имеется слой из окиси серебра и окиси цезия, на котором адсорбированы атомы металлического цезия.

Спектральная характеристика серебряно-кислородно-цезиевого фотокатода показана на рис. 11. Очевидно, что его максимальная чувствительность соответствует $\lambda = 0{,}8$ *мк*, а «красная» граница чувствительности $\lambda_0 \approx 1{,}1 - 1{,}2$ *мк*. Заметим, что такое распределение спектральной чувствительности $g_\lambda = f(\lambda)$ свойственно не только серебряно-кислородно-цезиевым фотоэлементам, но и другим приемни-

кам, чувствительным слоем которых является серебряно-кислородно-цезиевый фотокатод (электронно-оптическим преобразователям, фотоэлектронным умножителям, передающим телевизионным трубкам).

Фотоэлементы такого рода делятся на два вида с резко различными характеристиками: 1) вакуумные фотоэлементы; 2) наполненные инертным газом при низком давлении. Наполнение фотоэлемента газом приводит к значительному повышению его общей чувствительности (за счет ионизации газа освобожденными излучением электронами); однако при этом повышается инерционность фотоэлемента.

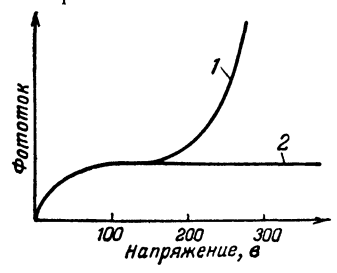


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

1 — газонаполненный фотоэлемент; 2 — вакуумный фотоэлемент.

На рис. 12 показаны вольт-амперные характеристики вакуумного и газонаполненного фотоэлементов. Очевидно, что нарастание тока в вакуумных фотоэлементах происходит только до тех пор, пока все освобожденные электроны не будут захвачены анодом. Далее наступает насыщение, и ток перестает увеличиваться при повышении приложенного напряжения.

В газонаполненном фотоэлементе, начиная с некоторого критического напряжения $U_{заж}$, процесс ионизации бурно нарастает, что может привести к появлению дуги и к необратимой порче фотоэлемента. Напряжение зажигания

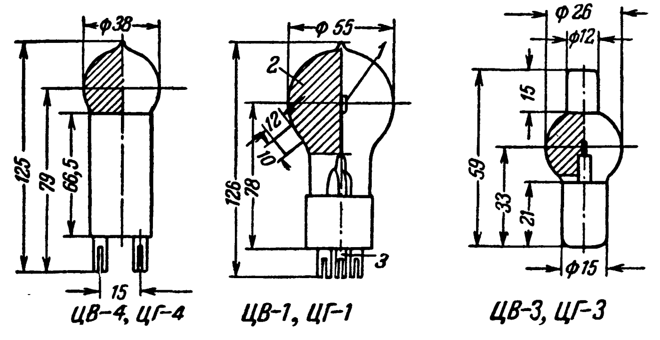


Рис. 13. Конструктивное оформление кислородно-цезиевых фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

1 — анод; 2 — фотокатод; 3 — выводы анода и фотокатода.

$U_{заж}$ обычно на 60—70 *в* выше номинального, поэтому следует остерегаться повышения напряжения на фотоэлементе свыше 240—250 *в*.

В табл. 4 приведены данные о серебряно-кислородно-цезиевых фотоэлементах марки ЦВ (вакуумных) и ЦГ (газонаполненных), выпускаемых нашей промышленностью. На рис. 13 показаны варианты конструктивного оформления фотоэлементов с внешним фотоэффектом.

Таблица 4

Основные параметры и характеристики кислородно-цезиевых фотоэлементов

Тип фотоэлемента	Рабочее напряжение, *в*	Минимальное значение напряжения зажигания, *в*	Минимальная начальная чувствительность, *мка/лм*	Максимальное значение темнового тока, *мка*	Максимальная крутизна вольтамперной характеристики, %	Максимальное снижение частотной характеристики в полосе 300—8 000 *гц*, *дб*	Максимальные относительные величины шумов, *дб*	Минимальное значение интегральной чувствительности после непрерывной работы в течение 700 *ч*, *мка/лм*
ЦГ-1	240	300	75	0,1	2,2	—7	—68	25
ЦВ-1	240	—	20	0,1	—	—	—	—
ЦГ-3	240	300	100	0,1	2,2	—5	—72	25
ЦВ-3	240	—	20	0,1	—	—	—	—
ЦГ-4	240	300	100	0,1	2,2	—7	—72	25
ЦВ-4	240	—	20	0,1	—	—	—	—

Примечание. Интегральная чувствительность измерена при световом потоке до 0,01 *лм* для типов ЦГ-1, ЦВ-1, ЦГ-4 и ЦВ-4 и до 0,005 *лм* для типов ЦГ-3 и ЦВ-3.

Вакуумные фотоэлементы фактически безынерционны и допускают использование при любых частотах модуляции до $2 \cdot 10^3$ *гц*. В газонаполненных фотоэлементах инерционность заметна, поэтому при выборе частоты модуляции необходимо считаться с их частотной характеристикой.

Способы усиления фототоков, получаемых от фотоэлементов с внешним фотоэффектом, рассматриваются ниже.

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Эти приемники излучений основаны на использовании эффекта вторичной электронной эмиссии, суть которой состоит в вырывании вторичных электронов из вещества при бомбардировке его первичными электронами, которые передают свою энергию вторичным. Приборы, основанные

на вторичной электронной эмиссии, имеют три основных элемента: 1) источник первичных электронов (первичный фотокатод); 2) эмиттирующую поверхность (эмиттер, которых может быть несколько); 3) электрод, собирающий вторичные электроны (коллектор).

Если первичный электронный ток падает на поверхность, коэффициент вторичной эмиссии σ которой больше единицы, то в цепи коллектора вторичных электронов будет протекать ток, усиленный в σ раз по сравнению с первичным. В настоящее время чаще всего применяются многокаскадные умножители, в которых используется последовательное многократное умножение электронного тока с помощью ряда эмиттеров так, что после двух каскадов усиление составляет σ^2, после трех каскадов оно равно σ^3 и т. д. Полный коэффициент усиления при n каскадах (если значение σ одинаково для каждого из них) выразится как

$$\eta = \sigma^n.$$

В действительности полной тождественности каскадов не бывает, и вследствие рассеивания и потерь электронов

$$\eta = \sigma_1 \sigma_2 \ldots \sigma_n,$$

где $\sigma_1, \sigma_2 \ldots \sigma_n$ — коэффициенты вторичной эмиссии отдельных каскадов.

Спектральная характеристика фотоэлектронных умножителей (сокращенно обозначаемых ФЭУ) определяется свойствами фотокатода. В качестве приемника инфракрасных излучений используются ФЭУ с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом, спектральная характеристика которого была приведена на рис. 11. Световая характеристика ФЭУ является прямолинейной только до определенных пределов освещенности, зависящей от типа прибора.

Примером умножителя, чувствительного к коротковолновым инфракрасным излучениям, является выпускаемый нашей промышленностью ФЭУ-22, общий вид которого показан на рис. 14. Он имеет боковой оптический вход и серебряно-кислородно-цезиевый фотокатод размерами 5 × × 16 *мм* на металлической пластине. В колбе прибора расположены 13 эмиттеров из алюминиево-магниевого сплава. Аноды каскадов выведены через боковую стенку колбы. Чувствительность фотокатода составляет 10—12 *мка/лм*. Характеристики зависимости усиления (кривые *1* и *2*) и темновых токов (кривые *3* и *4*) от напряжения на каскад

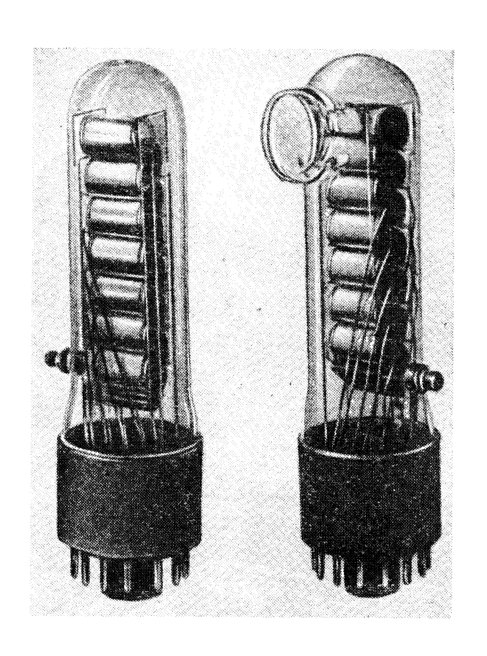


Рис. 14. Общий вид фотоэлектронного умножителя ФЭУ-22.

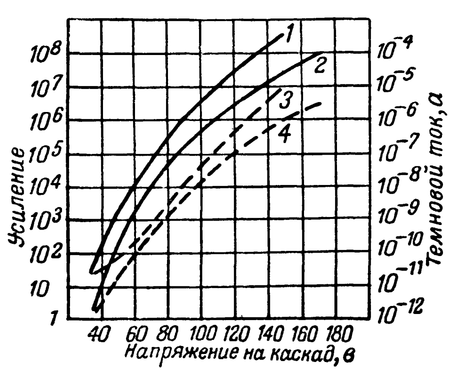


Рис. 15. Характеристики усиления и темновых токов фотоэлектронного умножителя ФЭУ-22.

приведены на рис. 15. ФЭУ-22 отличается хорошей линейностью световой характеристики примерно до 1 *мк* (при $U_{раб}$ = 1 400 *в*) и хорошей стабильностью (работает до 1 000 *ч* без изменения параметров).

ВЕНТИЛЬНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Действие вентильных фотоэлементов основано на фотоэффекте в запирающем слое (или вентильном фотоэффекте). Суть явления заключается в следующем. При соприкосновения полупроводника с металлом между ними образуется очень тонкий промежуточный слой, обладающий односторонней проводимостью. При облучении этого слоя (запирающего слоя) между металлом и полупроводником создается разность потенциалов. Если замкнуть при этом цепь, то по ней пойдет ток от облучаемого металла к полупроводнику. Этот ток будет тем больше, чем больше освещенность на поверхности соприкосновения металла и полупроводника.

Вентильные фотоэлементы имеют гораздо большую общую (интегральную) чувствительность (она определяется при облучении источником света при температуре 2 840° К), чем фотоэлементы с внешним фотоэффектом, как это видно из табл. 5.

Таблица 5

Общая (интегральная) чувствительность различных фотоэлементов

Фотоэлементы	Максимальная общая чувствительность, *мка/лм*
С внешним фотоэффектом	150
Сернисто-серебряный вентильный	8 000
Серноталлиевый вентильный	11 000

Из особенностей вентильных фотоэлементов следует отметить, что их световые характеристики (зависимость фототока от величины падающего потока излучения) заметно отклоняются от линейности при увеличении нагрузки. Кроме того, инерционность вентильных фотоэлементов значительно выше, чем у вакуумных фотоэлементов. Оба эти факта ограничивают область практического использования вентильных фотоэлементов, несмотря на их большую общую чувствительность.

В качестве примера вентильных фотоэлементов, обладающих чувствительностью в инфракрасной области спектра, можно привести сернисто-серебряные фотоэлементы. В оте-

чественном производстве эти фотоэлементы выпускаются под марками ФЭСС-У2, ФЭСС-У3 и ФЭСС-У10 (цифра обозначает величину рабочей площади фотоэлемента в квадратных сантиметрах).

Общая (интегральная) чувствительность ФЭСС очень велика и доходит до 8 600 *мка/лм* (чаще она составляет до 6 000—7 000 *мка/лм*). Эти фотоэлементы весьма стабильны и стареют незначительно [1]. Спектральная чувствительность ФЭСС простирается на область 0,4—1,4 *мк* с максимумом на участке 0,8—0,9 *мк*.

Инерционность ФЭСС велика, в связи с чем сернисто-серебряные фотоэлементы следует использовать только для измерения инфракрасного излучения, не подвергаемого модуляции.

ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Фотосопротивление представляет собой полупроводниковый приемник лучистой энергии, электрическое сопротивление которого уменьшается под действием потока излучения.

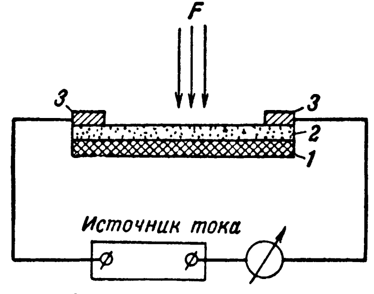


Рис. 16. Конструкция фотосопротивления.

1 — изолирующая подложка; *2* — полупроводниковый чувствительный слой; *3* — электроды.

Дополнительная электропроводность, возникающая в фотосопротивлении при воздействии излучения, называется фотопроводимостью.

Необлучаемое фотосопротивление имеет некоторую «темновую» проводимость, определяемую существующими в зоне проводимости полупроводника при данной температуре электронами. Облучение фотосопротивлений добавляет к этим электронам другие электроны, переходящие из примесей полупроводника в зону проводимости.

Следует заметить, что в зависимости от природы полупроводника (электронной или дырочной) носителями тока могут являться как электроны, так и дырки (недостаток электронов в атоме).

Конструкция фотосопротивления, показанная на рис. 16,

[1] Под старением подразумевается увеличение внутреннего сопротивления и фото-э. д. с. и уменьшение тока короткого замыкания со временем.

весьма проста: на изолирующую подложку *1* (чаще всего она сделана из стекла) наносится посредством испарения в вакууме очень тонкий слой полупроводника *2* и поверх него металлические электроды *3*. Полученная пластинка армируется либо в пластмассовую оправу, либо в стеклянный корпус (в случае охлаждаемой конструкции) с окном, прозрачным для падающего излучения. Металлические электроды, осуществляющие надежный контакт с краями фотосопротивления, присоединяются к выводам, включаемым последовательно с источником питания в цепь.

Поверх чувствительного слоя наносится тонкая пленка лака для защиты фотосопротивления от вредного влияния окружающей среды. Эта пленка также должна быть прозрачна для излучений в используемом участке спектра.

При отсутствии излучения по цепи фотосопротивления протекает ток $i_т$, который называют темновым током. Величина его определяется значением темнового сопротивления чувствительного слоя и приложенной к нему разностью потенциалов. Когда на фотосопротивление падает поток излучения, ток возрастает и достигает некоторого значения i (световой ток). Разность $\Delta i = i - i_т$ представляет собой фототок, т. е. ток, образованный освобожденными падающим излучением носителями тока (электронами или дырками).

Чувствительность фотосопротивлений (общая, спектральная и пороговая) очень сильно зависит от температуры. При понижении температуры (начиная от комнатной) темновой ток $i_т$ быстро уменьшается, что связано с увеличением сопротивления полупроводникового слоя по экспоненциальному закону. Изменение $i_т$ можно учесть зависимостью

$$i_т = ae^{-\frac{b}{T}},$$

где T—температура; a и b—постоянные, очень мало зависящие от T; e — основание натуральных логарифмов.

Что касается фототока Δi, вызываемого падающим на фотосопротивление излучением, то он зависит от температуры значительно слабее. В результате этого отношение $\Delta i / i_т$ при понижении температуры быстро возрастает. Уровень собственных шумов фотосопротивлений при понижении температуры понижается, особенно у тех сопротивлений, у которых кривая спектральной чувствительности

простирается дальше в инфракрасную область спектра. Так, например, у наиболее употребительных в технике инфракрасных лучей сернисто-свинцовых сопротивлений PbS при их охлаждении твердой углекислотой (до 195° К или—78° С) общая чувствительность возрастает по сравнению с чувствительностью при 20° С в десятки и сотни раз.

Глубокое охлаждение фотосопротивлений вызывает также сдвиг кривой спектральной чувствительности в сторону длинных волн, что является очень выгодным. На рис. 17 показаны спектральные характеристики фотосопротив-

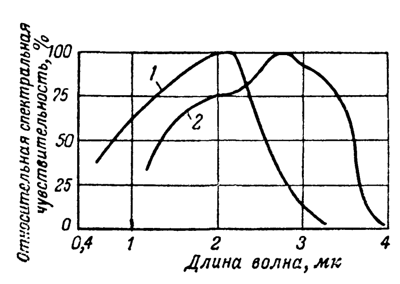


Рис. 17. Спектральные характеристики сернисто-свинцовых фотосопротивлений при различных температурах.

1 — при температуре + 20° С; 2 — при температуре — 170° С.

Рис. 18. Частотные характеристики сернисто-свинцовых фотосопротивлений при различных температурах.

1 — при температуре + 20° С; 2 — при температуре — 170° С.

лений PbS (типа ФС-А1) при различных температурах: при 20° С (293° К) и при 90° К (охлаждение жидким азотом или жидким воздухом).

Фотосопротивления обладают некоторой инерционностью, оценка которой дается их частотными характеристиками. Последние для сернисто-свинцового фотосопротивления (типа ФС-А1) при разных температурах показаны на рис. 18. Из кривых видно, что глубокое охлаждение фотосопротивления сказывается на повышении его инерции.

Из различных фотосопротивлений, выпускаемых нашей промышленностью, в качестве приемников инфракрасных излучений используются сернисто-свинцовые фотосопротивления PbS, разработанные Б. Т. Коломийцем. Марки этих сопротивлений: ФС-А1, ФС-А2, ФС-А3 и ФС-А4; их внешний вид показан на рис. 19. Фотосопротивления типов ФС-А1 и ФС-А4, снабженные штырьками для включения в ламповую панельку, наиболее употребительны. Их основные размеры показаны на рис. 20.

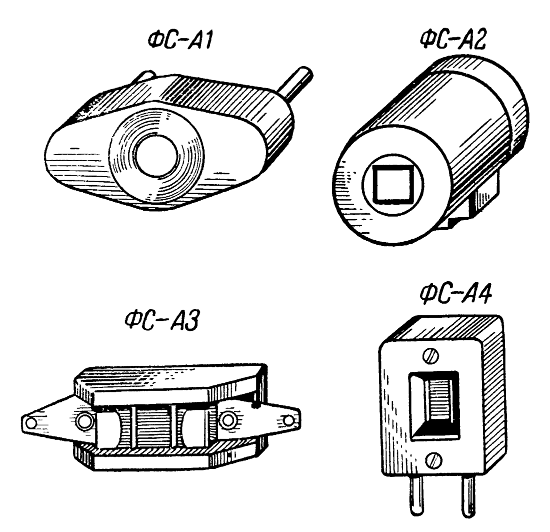


Рис. 19. Внешний вид сернисто-свинцовых фотосопротивлений.

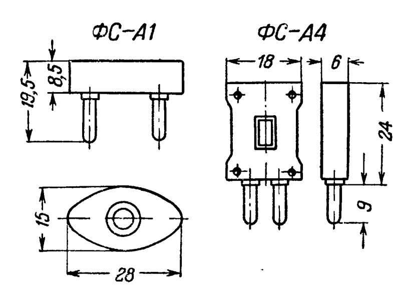


Рис. 20. Основные размеры фотосопротивлений ФС-А1 и ФС-А4.

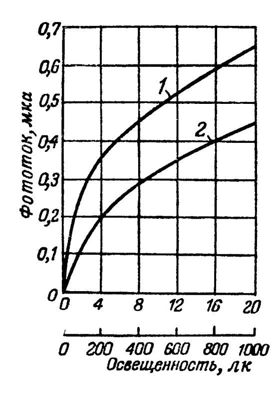


Рис. 21. Световые характеристики фотосопротивлений ФС-А1.

1 — освещенность от 0 до 20 *лк*; *2* — освещенность от 0 до 1 000 *лк*. Приложенное напряжение $U_{раб} = 1{,}3$ *в*. Значения фототока, взятые по кривой *2*, следует умножать на 10.

Темновое сопротивление ФС-А1 и ФС-А4 составляет от 10^4 до 10^5 *ом*, максимальное рабочее напряжение равно 15 *в*, удельная чувствительность[1] составляет приблизительно 500 *мка/лм*. Площадь чувствительной поверхности ~0,25 *см*².

[1] Удельная чувствительность $g_0 = \frac{\Delta i}{FU}$, где Δi — фототок; F — поток излучения; U — приложенное к фотосопротивлению напряжение. Эта характеристика употребляется при существовании линейной зависимости между фототоком и напряжением.

На рис. 21 показаны световые характеристики фотосопротивлений ФС-А1 и ФС-А4, которые, как это видно из графика, имеют нелинейный характер.

При использовании фотосопротивлений большое значение имеет снижение уровня собственных шумов. Установ-

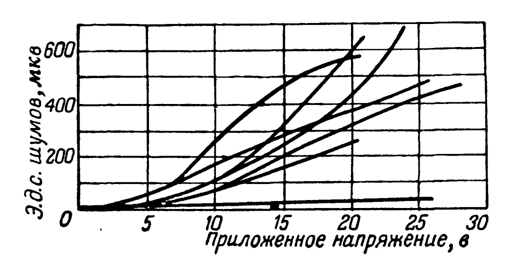


Рис. 22. Зависимость напряжения шумов от приложенной к фотосопротивлению разности потенциалов для нескольких образцов ФС-А1.

лено, что уровень шумов сернисто-свинцовых фотосопротивлений сильно зависит от величины напряжения, приложенного к фотосопротивлению. На рис. 22 показана

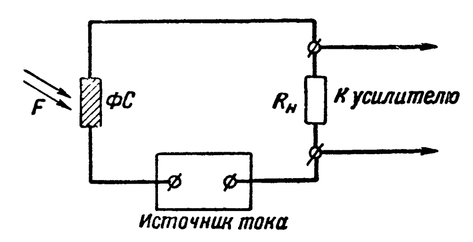


Рис. 23. Принципиальная схема включения сернисто-свинцового фотосопротивления на вход усилителя.

ФС — фотосопротивление; $R_н$ — сопротивление нагрузки

зависимость напряжения шумов от приложенного напряжения для нескольких образцов ФС-А1.

Очевидно, что приложенное к фотосопротивлению напряжение $U_{раб}$ следует ограничивать во избежание роста шумов; кроме того, чрезмерное напряжение может вывести фотосопротивление из строя. К фотосопротивлению ФС-А1 рекомендуется прикладывать такое $U_{раб}$, при котором темновой ток $i_т \approx 100$ *мка*.

Фотосопротивления типов ФС-А стабильны в работе, долговечны и не боятся чрезмерных облучений.

На рис. 23 приведена принципиальная схема включения сернисто-свинцового фотосопротивления на вход усилителя.

УСИЛЕНИЕ ТЕРМОТОКОВ И ФОТОТОКОВ[1]

Конечной задачей любого приемника инфракрасных излучений является преобразование падающего на него потока излучения в электрические сигналы с тем, чтобы последние можно было использовать в различного рода сигнальных, измерительных, регистрирующих устройствах или в автоматически действующих механизмах. Однако воспринимаемая приемником лучистая энергия часто бывает столь мала, что получаемые электрические сигналы без значительного усиления непригодны для дальнейшего использования.

Для усиления термотоков и фототоков используются либо усилители постоянного тока, либо усилители низкой частоты. Использование усилителей постоянного тока в настоящее время ограничено в силу того, что при больших коэффициентах усиления они работают неустойчиво. При использовании усилителей низкой частоты термотоки или фототоки вначале тем или иным способом модулируются, а затем усиливаются. Разумеется, в каждом конкретном случае в зависимости от типа приемника лучистой энергии, системы модуляции и типа индикатора (исполнительного механизма) должны подбираться параметры усилителя низкой частоты.

Усилители низкой частоты, в том числе и усилители, применяемые в технике инфракрасных лучей, характеризуются рядом эксплуатационных и качественных показателей, основными из которых являются: 1) минимальная величина входного напряжения (чувствительность усилителя); 2) коэффициент усиления усилителя; 3) искажения, вносимые усилителем; 4) мощность сигнала на выходе усилителя; 5) полоса усиливаемых частот.

В связи с тем, что современные приемники лучистой энергии обладают низким к. п. д. и зачастую работают в условиях низкой освещенности (падающий поток излучения порядка 10^{-7}—10^{-8} *вт*), минимальная величина входного сигнала, подаваемого на усилитель, лежит в пределах 10^{-7}—10^{-8} *в*. Следовательно, чувствительность усилителя

---

[1] Данный раздел написан В. Н. Морозовичем.

должна рассчитываться на этот предел. Однако в некоторых инфракрасных устройствах имеется возможность получить на приемнике гораздо большие потоки излучения и, следовательно, гораздо большие сигналы на входе усилителя. Таким образом, минимальная величина входного сигнала прежде всего определяется величиной падающего на приемник потока излучения и возможностями приемника.

Амплитуда выходного напряжения в зависимости от типа индикатора (исполнительного механизма) лежит в пределах единиц или десятков вольт. Отсюда коэффициент усиления усилителя $K_у = U_{вых}/U_{вх}$ должен быть порядка 10^8—10^9. При таком высоком коэффициенте усиления на работе усилителя в сильной степени начинают сказываться различного рода помехи. Эти помехи могут быть как внешнего, так и внутреннего происхождения.

Внешние помехи могут возникнуть как за счет электрических наводок (наводки от электрических установок, силовых цепей, систем зажигания двигателей, грозовых разрядов и т. д.), так и за счет механических и акустических воздействий на усилитель, что может привести к возникновению микрофонного эффекта. Устранение подобного рода помех достигается тщательной экранировкой усилителя в целом, отдельных его элементов и подводящих цепей, а также применением амортизации.

Внутренние помехи усилителя возникают за счет: 1) недостатков монтажа, что приводит к шумам и трескам на выходе усилителя; 2) нестабильности источников питания, что также приводит к шумам; 3) генерации, возникающей вследствие наличия паразитных обратных связей; 4) флуктуационных шумов; 5) шумов ламп. Для устранения помех первых трех видов необходимо уделить особое внимание тщательности монтажа и рациональному выбору деталей схемы, исключающему паразитные обратные связи. Кроме того, необходимо использовать высококачественные детали и стабильные не шумящие источники питания.

Любое сопротивление, даже не включенное в цепь тока, имеет на своих концах напряжение, обусловленное тепловым движением электрических зарядов. Это напряжение носит случайный, хаотический характер и создает на концах сопротивления напряжение тепловых (флуктуационных) шумов.

Борьба с этим видом шумов весьма затруднительна, так как в этом случае источником шума являются сами элементы схемы и даже приемник лучистой энергии (напри-

мер, фотосопротивление). Для уменьшения этого вида шумов применяют специальные компенсационные схемы, подбирают надлежащим образом величины входных сопротивлений, включают на входе схемы вместо активных сопротивлений реактивные (например, дроссели или трансформаторы) и делают усилители узкополосными. Полоса усиливаемых частот в усилителях, используемых в технике инфракрасных лучей, лежит обычно в пределах от десятков до сотен герц.

Сильное влияние на общий уровень шумов оказывают собственные шумы ламп, причинами которых являются изменение анодного тока вследствие так называемого дробового эффекта; непостоянство распределения во времени потока электронов между анодом и другими положительно заряженными электродами и несовершенство вакуума в лампе.

Количественную оценку шумовых свойств ламп принято проводить при помощи некоторого эквивалентного сопротивления, которое, будучи включенным в цепь управляющей сетки лампы, создает напряжение тепловых шумов, равное напряжению шумов, создаваемых данной лампой, пересчитанному в цепь сетки. Для триодов это сопротивление можно найти по формуле

$$R_{ш} = \frac{2,3 \div 3}{S},$$

где S — крутизна триодов, *ма/в*.

Напряжение шумов тетрода и пентода в 3—5 раз выше напряжения шумов триода.

Наиболее сильно сказываются шумы первой лампы усилителя, поэтому для уменьшения общего уровня шумов первый каскад усилителя, как правило, выполняют на триодах (или на пентодах в триодном включении).

В качестве усилителей низкой частоты в технике инфракрасных лучей могут применяться усилители на сопротивлениях, на дросселях и на трансформаторах.

Усилители на сопротивлениях используются тогда, когда необходимо усиливать достаточно широкую полосу частот. Однако эти усилители имеют тот недостаток, что на сопротивлении анодной нагрузки получается значительное падение напряжения, а это приводит к снижению анодного напряжения лампы.

От этого недостатка свободен усилитель низкой частоты на дросселях, в котором в качестве анодной нагрузки ис-

пользуется дроссель, имеющий малое активное и достаточно большое индуктивное сопротивление. В то же время усилители на дросселях требуют сложных и дорогостоящих дросселей (обычно с сердечником), что приводит к сильным искажениям в силу неравномерности усиления по частоте. Поэтому в настоящее время схемы на дросселях употребляются сравнительно редко.

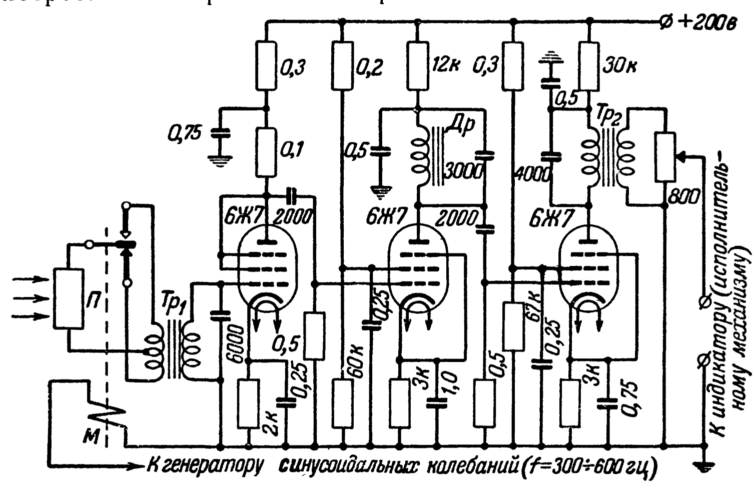


Рис. 24. Типичная схема усилителя термотока.

Наиболее широкое распространение в технике инфракрасных лучей нашли усилители на трансформаторах. Такие усилители, помимо получения высокого коэффициента усиления, позволяют наиболее рационально согласовать параметры отдельных каскадов усилителя и сделать усилитель в достаточной степени избирательным.

На рис. 24 приведен пример усилителя термотока, в котором использованы все три схемы усилителей низкой частоты. Параметры этой схемы таковы: 1) чувствительность усилителя 10^{-7}—10^{-8} *в;* 2) коэффициент усиления усилителя $K_у = 10^8$; 3) частота модуляции равна 600 *гц*; 4) полоса усиливаемых частот составляет 10 *гц*.

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электронно-оптическими преобразователями (ЭОП) называются приборы, предназначенные для преобразования невидимого изображения предмета, создаваемого на фото-

катоде с помощью инфракрасных лучей, в электронное изображение, а затем в видимое изображение, получаемое на флуоресцирующем экране.

Современные электронно-оптические преобразователи осуществляются в виде вакуумных приборов с электростатической фокусировкой электронных лучей. Схема простейшего (без электростатической фокусировки) ЭОП показана на рис. 25. В приборе имеется серебряно-кислородно-цезиевый фотокатод, анод (флуоресцирующий

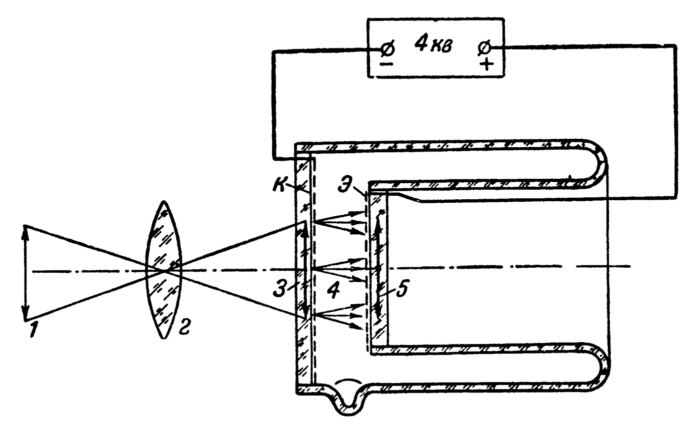


Рис. 25. Схема электронно-оптического преобразователя.

1 — наблюдаемый объект; *2* — объектив; *3*—инфракрасное изображение; *4* — электронный перенос изображения на экран; *5* — световое изображение на экране, *К* — фотокатод; *Э* — флуоресцирующий экран.

экран). В более сложных ЭОП имеются дополнительные электроды, являющиеся электростатическими линзами. Создаваемое ими электрическое поле ускоряет электроны и фокусирует электронные лучи, создавая достаточно четкое изображение на экране. Прикладываемое к ЭОП напряжение составляет 6—18 и более киловольт.

Электронно-оптические преобразователи с электростатической фокусировкой обладают рядом достоинств: 1) они создают малый кружок рассеяния в изображаемой на экране точке, в результате чего обеспечивается высокая разрешающая способность прибора (до 30—40 *лин/мм*, как у хороших фотообъективов); 2) в таких ЭОП имеется возможность применять более высокие ускоряющие разности

потенциалов (до 20 *кв*) без опасности возникновения самопроизвольной электронной эмиссии с катода, что позволяет создавать более высокую яркость изображения на флуоресцирующем экране, которая возрастает с увеличением кинетической энергии электронов, бомбардирующих экран; 3) создается возможность получать различные электронно-оптические увеличения в приборе (например, меньшие единицы) и благодаря этому, а также используя ускорение электронов, получать на экране изображения с более высокой яркостью, чем у наблюдаемых объектов (что является принципиально невозможным в оптике световых лучей).

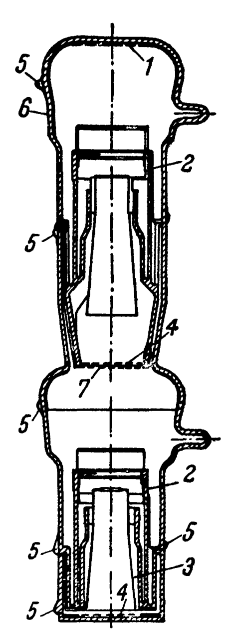


Рис. 26. Двухкамерный электронно-оптический преобразователь.

1 — фотокатод; *2*—первый анод; *3* — второй анод; *4* — экран; *5* — контакт; *6* — металлизация; *7* — стеклянная перегородка

Спектральная чувствительность ЭОП определяется свойствами примененного в них фотокатода и для ЭОП с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом является такой же, как у соответствующих фотоэлементов (см. рис. 11). Такой ЭОП является типичным приемником для коротковолновых инфракрасных излучений (0,8—1,2 *мк*) и используется почти во всех электронно-оптических приборах наблюдения (например, в военных приборах для видения в темноте).

Отметим, что яркость изображения в ЭОП может быть сильно повышена путем использования каскадов ЭОП, т. е. передачи излучения флуоресцирующего экрана первого ЭОП на фотокатод следующего ЭОП и т. п. Такие комбинации электронно-оптических преобразователей практически осуществлены и конструктивно оформляются в одном корпусе. На рис. 26 показан пример немецкого каскадного двухкамерного ЭОП.

Питание ЭОП обычно осуществляется от щелочных аккумуляторов, включенных в цепь вибропреобразователя, создающего переменное напряжение на первичной обмотке повышающего трансформатора. Напряжение с вторичной обмотки выпрямляется и после сглаживания конденсаторами подается на электроды ЭОП. Расход энергии при этом ничтожно мал (ток через ЭОП не превышает 10^{-9}—10^{-8} *а*).

ПРОХОЖДЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СКВОЗЬ ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И АТМОСФЕРУ

ОСЛАБЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ В СРЕДЕ

Ослабление инфракрасных излучений в среде, сквозь которую они проходят, возникает вследствие поглощения и рассеяния. В первом случае лучистая энергия, поглощенная материальными частицами среды, превращается в другие виды энергии (главным образом в тепловую энергию), во втором случае излучение отклоняется частицами среды в сторону или назад, так что в первоначальном направлении проходит только часть проходящего сквозь среду потока излучения. Всеобщий закон ослабления в среде дается экспоненциальной формулой Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kx},$$

где Φ—поток, прошедший через толщу x среды; Φ_0—вступивший в эту толщу поток; e — основание натуральных логарифмов; k — натуральный показатель ослабления, учитывающий обе причины ослабления (поглощение и рассеяние) и рассчитываемый на единицу толщи среды. Закон этот соблюдается с большей или меньшей точностью, причем имеет значение длина волны проходящего излучения.

Учет ослабления инфракрасных излучений имеет очень большое значение для техники инфракрасных лучей, позволяя оценивать дальность действия аппаратуры и рассчитывать ее оптические детали. Здесь мы остановимся кратко только на пропускании инфракрасных излучений оптическими материалами, используемыми в специальной аппаратуре (для линз, призм, фильтров, окон и т. п.) и на пропускании инфракрасных излучений атмосферой.

ПРОПУСКАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ОПТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Пропускание инфракрасных излучений различными материалами принимается во внимание при конструировании специальной аппаратуры, в которой всегда имеются оптические детали, рассчитанные на использование в инфракрасной области спектра. На рис. 27 дан ряд графиков, показывающих пропускание τ инфракрасных излучений с разной длиной волны λ различными оптическими материалами.

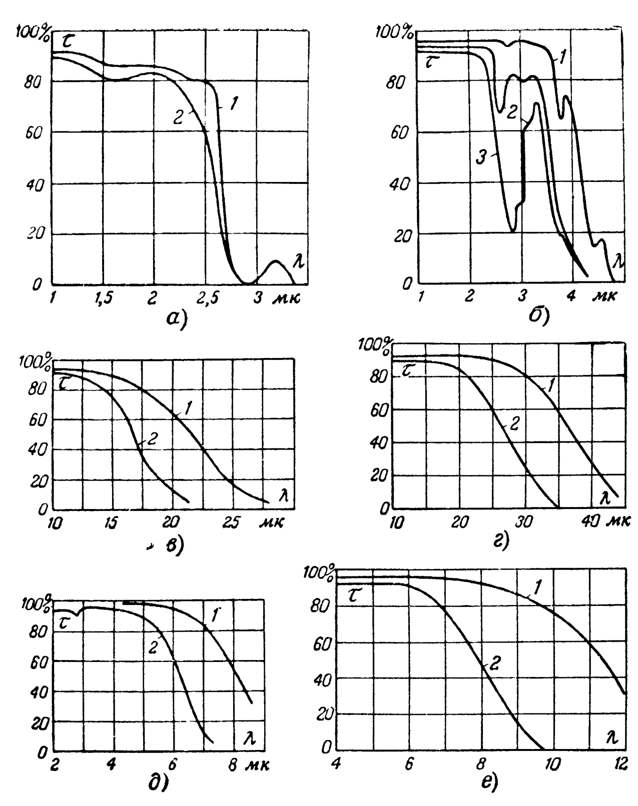
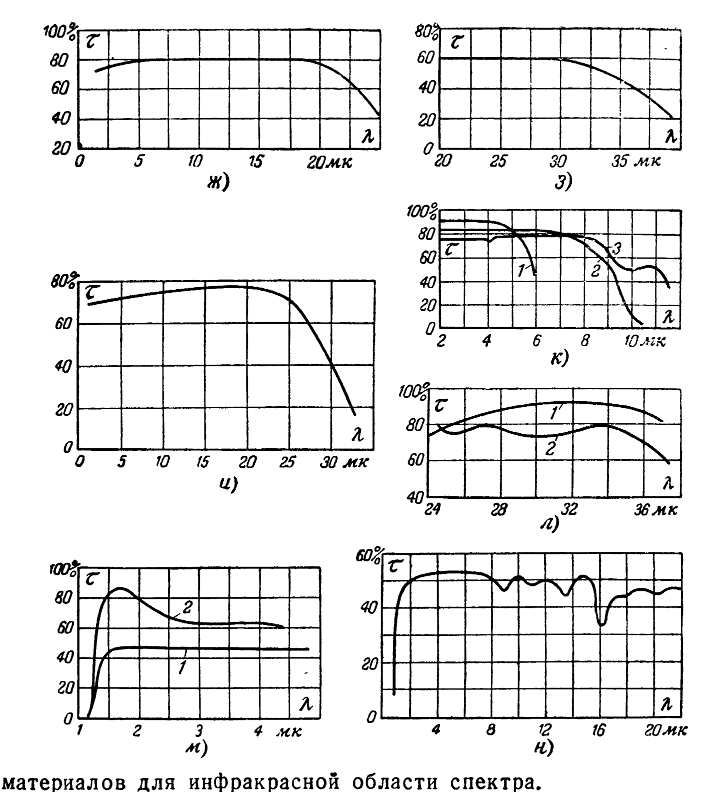


Рис. 27. Спектральное пропускание оптических
а — кронглас и флинтглас (*1* — кронглас толщиной 3 *мм*, *2* — флинтглас толщиной 0,25 *см*; *2* — плавленный кварц толщиной 1 *см*, *3* — кристаллический кварц нату-зец толщиной 1 *см*), *г* — бромистый калий (*1* — образец толщиной 1 *мм*, *2* — образец щиной 1,2 *см*), *е* — флуорит (*1* — толщиной 1 *мм*, *2* — толщиной 1 *см*); *ж* — хлористое *к* — некоторые специальные материалы для окон (*1* — сапфир толщиной 0,12 *см*, 0,5 *см*); *л* — тонкие пластинки (*1* — полистирол толщиной 0,0025 *см*, *2* — полиэтилен поверхности, *2* — толщиной 0,1 *см*, просветленный для максимального

Обычные оптические стекла (рис. 27,*а*) — кроны и флинты — пропускают инфракрасные излучения только до 2,7 *мк*, а стекло, применяемое для изготовления призм, только до 2,4 *мк*. Кристаллический кварц (рис. 27,*б*), используемый для изготовления призм в спектральных приборах, пропускает в инфракрасной области до 3,5 *мк*, а в тонких слоях (пластинки для окон) — до 5 *мк*. Гораздо более прозрачна для инфракрасных лучей каменная соль (рис. 27,*в*), пропускающая лучи до 23 *мк*, однако она разрушается влагой и требует особых предосто-



материалов для инфракрасной области спектра.

3 *мм*), *б* — плавленный и кристаллический кварц (*1* — плавленный кварц толщиной
ральный толщиной 1 *см*); *в* — каменная соль (*1* — образец толщиной 1 *мм*, *2* — обра-
толщиной 1 *см*); *д* — фтористый литий (*1* — образец толщиной 1 *мм*, *2* — образец тол-
серебро толщиной 0,5 *см*, *з* — KRS-5 толщиной 0,4 *см*; *и* — KRS-6 толщиной 0,35 *см*;
2 — периклаз толщиной 0,067 *см* *3* — стекло из трехсернистого мышьяка толщиной
толщиной 0,024 *см*), *м* — германий (*1* — толщиной 0,1 *см*, оптически полированные
пропускания при 2,2 *мк* с помощью селена); *н* — силикон толщиной 0,05 *см*.

рожностей при использовании в приборах. К материалам, хорошо пропускающим инфракрасные излучения с большой длиной волны, относится также бромистый калий (рис. 27,*г*), пропускающий лучи до 26—28 *мк* в толстом слое и до 40 *мк* — в тонком, а в более коротковолновой области — фтористый литий (рис. 27,*д*), прекрасно пропускающий в области 2—6 *мк*, флюорит (рис. 27,*е*), имеющий высокую прозрачность также в области 2—6 *мк*, и другие материалы.

В последнее время для оптических деталей, используемых в инфракрасной области спектра, стали применять

новые материалы, из которых с успехом изготовляются призмы и т. п. В качестве примера таких материалов можно привести хлористое серебро (рис. 27,*ж*), обладающее высокой и равномерной прозрачностью в области 5—20 *мк* (этот материал не растворим в воде), а также очень интересные кристаллы KRS-6 (рис. 27,*з*), представляющие совместную структуру из бромистого и иодистого таллия, и KRS-6 (рис. 27,*и*), являющиеся совместной структурой из бромистого и хлористого таллия. Первый из них обладает хорошим пропусканием почти до 40 *мк,* а второй—еще более высоким пропусканием в области 2—27 *мк.* Эти кристаллы механически очень прочны, прекрасно обрабатываются и почти не растворимы в воде.

Для окон инфракрасной аппаратуры применяются в тонких слоях специальные стекла (рис. 27,*к*) — сапфир (Al_2O_3), прекрасно пропускающий до 5,5 *мк,* периклаз (MgO), пропускающий до 9,5 *мк,* стекло из трехсернистого мышьяка, пропускающее до 10 *мк.* Многие пластики в тонких слоях также очень прозрачны для инфракрасных излучений с большой длиной волны, как это можно видеть на рис. 27,*л,* на котором даны кривые пропускания для пленок из полистирола и полиэтилена.

В ряде случаев приходится использовать фильтры, которые должны быть прозрачны для инфракрасных лучей и совершенно не прозрачны для видимых. Интересными материалами для этой цели являются монокристаллический германий (рис. 27,*м*), совершенно не прозрачный для излучений с длиной волны менее 1,2 *мк* и достаточно хорошо пропускающий инфракрасные лучи, и обладающий такими же свойствами (высокое пропускание до 22 *мк*) силикон — [кремний-органическая смола (рис. 27,*н*)]. Из этих материалов изготовляются с успехом линзы малых размеров и с большой апертурой.

Важно также отметить, что вода чрезвычайно сильно поглощает инфракрасные излучения. Обладая очень малой прозрачностью для них в тонком слое (до 1 *мм*), уже при толщине слоя в 1 *см* вода становится совершенно не проницаемой для инфракрасных излучений.

ПРОХОЖДЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СКВОЗЬ АТМОСФЕРУ

Пропускание атмосферой инфракрасных излучений в значительной мере зависит от метеорологических условий, в числе которых наиболее заметно влияет влажность

атмосферы, т. е. количество водяных паров и капелек воды в воздухе. Следовательно, пропускание атмосферой инфракрасных излучений существенно различается для ясной погоды, для воздушной дымки и легкого тумана, для плотного тумана и для дождя. Выше уже говорилось о том, что ослабление излучений в атмосфере обусловливается главным образом процессами рассеяния, которые находятся в сложной зависимости от характера, размеров и статистического распределения рассеивающих частиц в атмосфере.

Как известно, воздушная среда представляет собой механическую смесь газов (в основном азота и кислорода, а также ряда других газов в очень малых количествах). Воздух всегда содержит пары воды в различных количествах, зависящих от температуры и давления (высоты над уровнем моря). Кроме того, в нижних приземных слоях атмосферы всегда имеются взвешенные частицы — пыль, дым, капельки воды разнообразных размеров — от очень маленьких (образующих воздушную дымку) до крупных (образующих туман или выпадающих в виде дождя). Иногда в воздухе содержатся мелкие кристаллики льда (изморозь). Соотношение размеров рассеивающих частиц и длины волн проходящего излучения определяет характер рассеяния (распределение рассеянного излучения по разным направлениям — так называемую индикатриссу рассеяния, зависимость рассеяния от длины волны излучения и т. д.).

В очень чистой атмосфере, состоящей только из молекул газов (такая атмосфера характерна, например, для высокогорных условий), рассеяние обратно пропорционально четвертой степени длины волны проходящего излучения. В таких условиях рассеяние инфракрасных излучений практически отсутствует. При молекулярном рассеянии размер рассеивающих частиц R много меньше длины волны излучения λ. Однако при увеличении частиц (например, для капелек воды, создающих воздушную дымку или туман) характер рассеяния сильно изменяется. В условиях дымки ($R \approx \lambda$) или слабого тумана инфракрасные излучения ослабляются атмосферой значительно меньше, чем видимые лучи, но при густом плотном тумане, когда капельки воды велики ($R \gg \lambda$), инфракрасные излучения ослабляются так же сильно, как и видимые, и не имеют перед ними никаких преимуществ.

Поглощение излучений атмосферой является очень из-

бирательным: слой воздуха является фильтром, ослабляющим излучения очень неравномерно по спектру. В спектре излучений, пропущенных сквозь слой воздуха, имеется ряд полос поглощения, вызываемых наличием в воздухе водяных паров, углекислого газа CO_2 и ряда других газообразных веществ (озона, закиси азота, метана и др.). Главную роль в поглощении играют пары воды, полосы поглощения которых перекрывают в приземном слое воздуха полосы поглощения других газообразных веществ; такие полосы поглощения водяных паров соответствуют участкам спектра 1,2—1,5; 1,8—2; 2,5—3 и 5—8 *мк*.

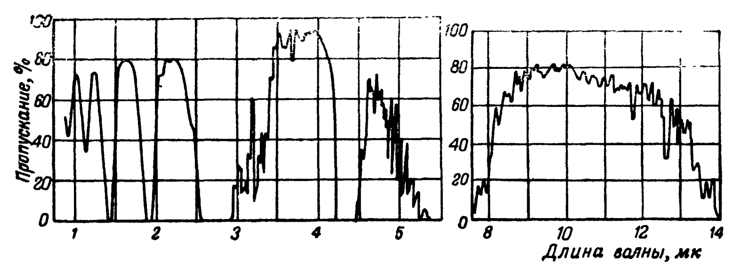


Рис. 28. Спектральное пропускание атмосферы (толщина слоя 1 850 *м*, приведенная толща водяных паров — 17 *мм*).

Наблюдения на высокогорных станциях и с самолетов на высотах, на которых влияние паров воды значительно ослаблено, показало наличие многочисленных полос поглощения озона, метана, газообразной тяжелой воды (гидроокиси дейтерия HDO) и других веществ. В результате этого кривые спектрального пропускания атмосферы имеют вид, подобный показанному на рис. 28, для одного из состояний атмосферы (толщина слоя 1 850 *м*, приведенная толща водяных паров равна 17 *мм*). Эти кривые, несколько разнящиеся друг от друга по абсолютной величине пропускания и ширине полос пропускания для разных состояний атмосферы, характерны наличием определенных полос пропускания — так называемых «окон прозрачности» атмосферы. Наибольшему пропусканию соответствуют «окна» 1—1,1; 1,2—1,3; 1,6—1,75; 2,1—2,4 (в них пропускание доходит до 80%); 3,4—4,2 (пропускание выше 90%) и широкое «окно» 8—12 *мк* с пропусканием 60—70%. Излучения с длинами волн, соответствующими промежуткам между «окнами», не проходят вовсе сквозь толщу воздуха.

Знание «окон прозрачности» очень важно для выбора

источников и приемников излучений, а также при определении дальности действия аппаратуры, работающей с использованием инфракрасных излучений.

ИНФРАКРАСНАЯ ФОТОГРАФИЯ

Использование инфракрасных излучений для фотографирования позволяет решить ряд научных, технических и художественных задач.

Благодаря отличию отражательной способности многих объектов в инфракрасной области спектра по сравнению с видимой областью фотографирование в инфракрасных лучах передает вид объектов совсем по-иному, нежели на обычной фотографии (это относится к естественной зелени, голубому небу, поверхности воды, некоторым краскам и т. д.).

Кроме того, сравнительно малые потери инфракрасных излучений при прохождении через замутненную атмосферу (при воздушной дымке или легком тумане) позволяют успешно фотографировать удаленные объекты, которые не получаются вовсе на обычном снимке.

Фотографирование в инфракрасных излучениях основано на том, что при нем используются материалы, чувствительные к этим излучениям. При этом видимые излучения, идущие от объекта, задерживаются непроницаемыми для них светофильтрами.

Инфракрасная фотография выполняется при помощи обычных или специальных фотографических аппаратов, в которых используются негативные фотографические материалы (пластинки или пленки), чувствительные к инфракрасным излучениям. Кроме того, существуют непрямые способы инфракрасной фотографии, которые применяются значительно реже и здесь не рассматриваются.

Фотографические негативные материалы, используемые в инфракрасной фотографии (инфрахроматические материалы), отличаются от обычных бромо-серебряных материалов наличием дополнительной области чувствительности к инфракрасным излучениям, кроме существующей у бромо-серебряных эмульсий чувствительности к ультрафиолетовым, синим и фиолетовым излучениям. На рис. 29 показана кривая спектральной чувствительности типичной инфрахроматической негативной пленки одновременно с кривой спектральной чувствительности бромо-серебряной эмульсии.

Создание дополнительной чувствительности фотографических эмульсий к тем излучениям, которые они обычно не чувствуют, называется **оптической сенсибилизацией**. Процесс оптической сенсибилизации осуществляется путем введения в эмульсию специальных красителей (оптических сенсибилизаторов). В настоящее время предельное достигнутое положение максимума сенсибилизации составляет $\sim$1,02 *мк*, а граница чувствительности инфрахроматических материалов $\sim$1,1 *мк*.

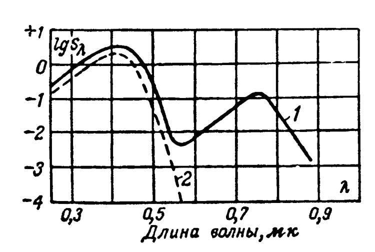


Рис. 29. Кривые спектральной чувствительности инфрахроматической негативной пленки и бромисто-серебряной эмульсии.

1 — инфрахроматическая пленка; *2* — обычная бромисто-серебряная эмульсия.

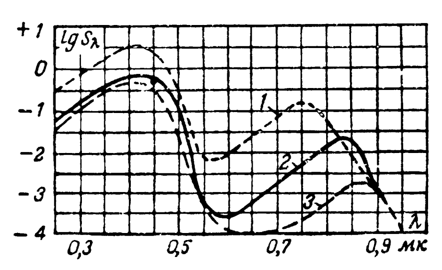


Рис. 30. Кривые спектральной чувствительности инфрахроматических негативных материалов.

1 — инфра 760; *2* — инфра 840; *3* — инфра 880.

Очень важно отметить факт, имеющий значение для практики инфракрасной фотографии: чем дальше в инфракрасную область спектра смещен максимум сенсибилизации, тем меньше (и притом в значительной степени) становится чувствительность и сохраняемость инфрахроматических материалов. Благодаря этому для технических целей чаще всего используются материалы, сенсибилизированные в области 0,76—0,88 *мк*, а материалы, с более далеким положением максимума сенсибилизации используются только для специальных научных целей (например, в спектрофотографии).

В табл. 6 приводятся некоторые данные об отечественных инфрахроматических материалах — инфрахром 760, инфрахром 840 и инфрахром 880 (цифра обозначает положение максимума сенсибилизации в тысячных долях микрона), а на рис. 30 представлены кривые спектральной чувствительности для этих материалов.

Инфрахроматические материалы с положением максимума сенсибилизации при длине волны примерно 0,7—0,85 *мк* используются для самых разнообразных целей

Таблица 6

Характеристики инфрахроматических материалов (по Ю. Н. Гороховскому и Т. М. Левенберг)

Фотографические характеристики	Типы материалов		
	инфрахром 760	инфрахром 840	инфрахром 880
Общая светочувствительность в единицах ГОСТ[1]	1,4	0,18	0,02
Максимальный коэффициент контрастности $\gamma_{макс}$	2	1,6	1,6
Разрешающая способность *R*, *мин/мм*	65	45	11
Фактор зернистости *G** . . .	22	22	22

[1] Светочувствительность определена под красным светофильтром КС-14 при рекомендуемой гамме $\gamma_{рек} = 1{,}3$

* Фактор зернистости $G = \frac{100}{m_{пр}}$, где $m_{пр}$ — предельный масштаб увеличения, когда зернистость становится мешающей.

(в медицине, микроскопии, ботанике, геологии, минералогии, для пейзажных съемок, исследования окрашенных образцов текстиля, фотографирования в темноте, археологических исследований и т. д.). Материалы с положением максимума сенсибилизации при $\lambda = 0{,}95$ или 1,05 *мк* используются в спектроскопии и астрономии.

При фотографировании в инфракрасных лучах на объектив аппарата надевают съемочный светофильтр, поглощающий видимые излучения либо полностью, либо за исключением красных лучей. На рис. 31 приведены кривые поглощения отечественных светофильтров, применяемых при инфракрасной фотографии. Наиболее пригодны светофильтры типов КС-10—КС-18, которые полностью поглощают сине-фиолетовые излучения, воздействующие на собственную чувствительность бромистого серебра.

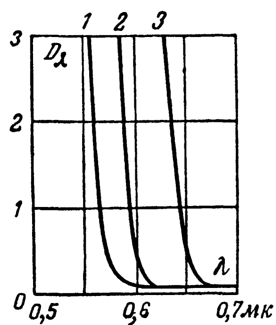


Рис. 31. Кривые оптической плотности D_λ светофильтров для инфракрасной фотографии.
1 — стекло ОС-14 толщиной 5 *мм*; *2* — стекло КС-4 толщиной 2 *мм*; *3* — стекло КС-14 толщиной 10 *мм*.

Интересно отметить, что для фотографирования в инфракрасных лучах не обязательно применять красные стекла, но можно с таким же успехом использовать плотные

желтые светофильтры, так как они также поглощают сине-фиолетовые излучения.

Для съемки в инфракрасных лучах используются обычные фотографические аппараты, однако надо иметь в виду, что некоторые материалы, примененные в них, пропускают инфракрасные излучения (например, меха из желтой кожи, матерчатые шторки малоформатных камер и т. п.). Поэтому обычно проверяют фотоаппарат, заряженный инфракрасной пленкой, выставив его под прямое солнечное освещение на 2—3 *мин*; если на проявленной пленке нет следов засветки или вуали, то аппаратом можно пользоваться.

Надо также иметь в виду, что наводка объектива на резкость, пригодная для видимых излучений, будет не точной для инфракрасных, особенно при большом фокусном расстоянии объектива. Причиной этого является разница в преломляющей способности оптических деталей аппарата для световых и для инфракрасных излучений. Поэтому опытным путем определяют величину, на которую надо сместить фокус от положения, соответствующего резкой наводке в световых лучах, чтобы снимок получился резким в инфракрасных лучах.

Необходимое смещение фокуса больше для объективов с большим фокусным расстоянием, но в общем оно невелико и составляет 0,2—0,3 *мм*. Поэтому при съемке удаленных предметов объективами с фокусным расстоянием менее 7—10 *см* с этой разницей в фокусных расстояниях для видимых и инфракрасных лучей можно не считаться.

Выдержка при съемке на инфрахроматических материалах определяется опытным путем, подбором и проявлением проб, так как экспонометров для этой цели не существует. Вообще же, при инфракрасном фотографировании требуются выдержки значительно большие, чем при обычной фотографии, ввиду низкой чувствительности негативных материалов.

Обработка инфрахроматических материалов ничем не отличается от обработки обычных негативных материалов

Примеры практического применения инфракрасной фотографии на инфрахроматических материалах приводятся ниже.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ НАУЧНЫХ ЦЕЛЕЙ

Использование инфракрасных излучений для научных целей в медицине, биологии и т. п. находит с каждым го-

дом все большее и большее распространение. Здесь мы остановимся кратко на наиболее существенных примерах таких применений.

ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Метод инфракрасной спектроскопии широко используется современной физикой для распознавания и установления тождественности всякого рода химических соединений, для тонкого количественного анализа смесей различных веществ и в особенности для изучения строения молекул. Этот метод исследований в настоящее время уже завоевывает области, далеко выходящие за пределы научных лабораторий и используемые в промышленности.

Инфракрасная спектроскопия дает возможность изучения спектров веществ в газообразном, твердом и жидком состояниях. Метод инфракрасной спектроскопии основан на том, что каждое химическое соединение в той или иной мере поглощает падающие на него инфракрасные излучения, причем это поглощение различно для различных длин волн.

Обычно инфракрасный спектр поглощения представляет собой систему более или менее широких полос с характерными для данного вещества (или химического соединения) положением и интенсивностью. Максимумы поглощения отдельных полос соответствуют частотам собственных колебаний молекул, различным комбинациям этих частот, а также частотам вращательного движения самой молекулы. Если данная смесь веществ составлена из химических соединений, не взаимодействующих между собой, то общий спектр смеси образуется как результат наложения спектров составляющих соединений. Зная при этом характерные особенности спектров отдельных соединений, исследователь получает возможность анализа химического состава смеси.

Отсюда становится ясной важность накопления данных об инфракрасных спектрах различных химических соединений и составления соответствующих таблиц и атласов таких спектров. В специальной литературе в настоящее время можно найти громадное число статей, посвященных этому вопросу.

Для получения инфракрасных спектров используются специальные спектральные приборы. В зависимости от участка инфракрасного спектра, в котором ведется исследование, в этих приборах применяются оптические детали

из различных материалов: в области длин волн 0,76—2,5 *мк* пользуются спектрографами со стеклянными или кварцевыми призмами, в области длин волн 2,5—25 *мк* используют призмы из фтористого лития (2,5—6 *мк*), флюорита (3—8 *мк*), каменной соли (6—15 *мк*), бромистого калия (10—25 *мк*) и других веществ. Многие из этих веществ, как уже говорилось выше, легко растворимы и повреждаются влагой, что заставляет применять особые приемы для предохранения от этого.

В ряде случаев употребляют спектральные приборы с дифракционными решетками, а для исследования спектров в далекой инфракрасной области (25—300 *мк* и далее) применяют эшелетты—разновидность плоских дифракционных решеток со штрихами особой ступенчатой формы.

В качестве источников излучения служат обычно тепловые излучатели (силитовый стержень и др.). Исследуемое вещество помещается в плоскопараллельном кювете с окнами, прозрачными для инфракрасных излучений в нужном участке спектра. Приемником излучений, располагаемым за выходной щелью спектрального прибора, служит болометр или термоэлемент, соединенный с усилительным и регистрирующим устройством, часто весьма сложным.

Посредством инфракрасной спектроскопии можно не только устанавливать химический состав вещества, но также следить за внутренними изменениями, происходящими в нем (например, изучать ход обезвоживания высушиваемых материалов, процессы полимеризации и конденсации смол, что является очень важным в производстве пластмасс, наблюдать за «старением» каучуков и резин, обнаруживать наличие вредных примесей, производить тщательную проверку состава жидкого горючего и т. д.).

ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИИ В АСТРОНОМИИ

Инфракрасная фотография, примененная для астрономических целей, позволяет прежде всего производить успешное фотографирование ночного неба вблизи больших сильно освещенных городов, где иногда расположены крупные астрономические обсерватории и где обычное фотографирование сопряжено с большими трудностями из-за рассеянного в атмосфере света.

Инфракрасные астрофотографии дают возможность получать изображения звезд на фоне туманностей, получать изображения некоторых «холодных» звезд, не запе-

чатлевающихся на обычных фотографических пластинках, исследовать в монохроматических излучениях (с помощью светофильтров) поверхность планет (например, Марса), изучать спектр различных планет и звезд, получать изо-

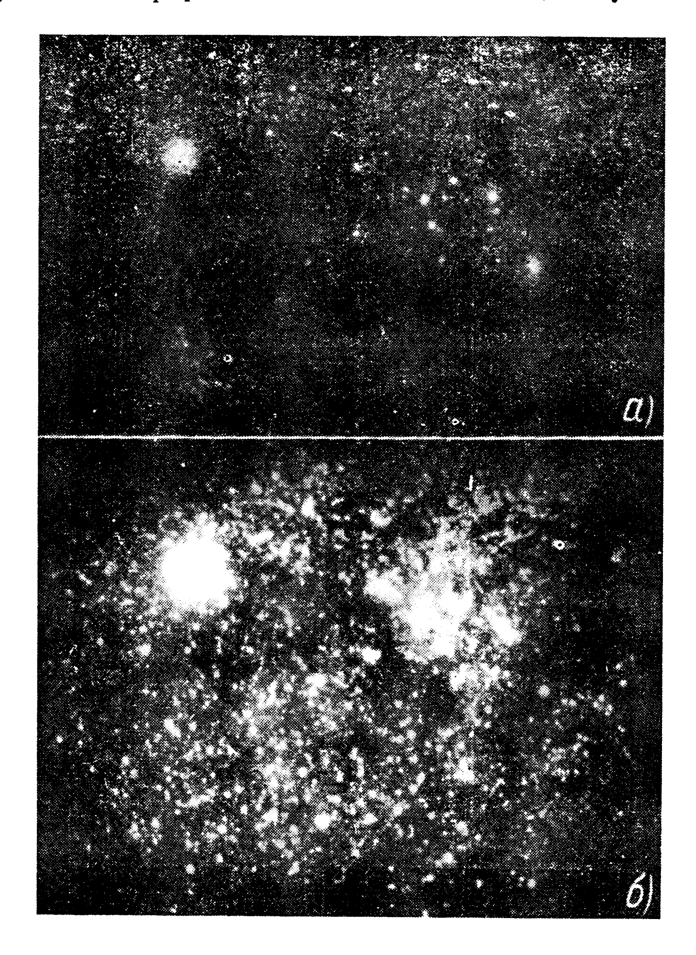


Рис. 32. Две фотографии туманности Ориона.
а — в видимых лучах; *б* — в инфракрасных лучах.

бражения небесных светил, окруженных газообразной атмосферой, и т. д. на рис. 32 показаны две фотографии туманности Ориона—одна обычная (*а*), вторая инфракрасная (*б*). Преимущества последней очевидны.

С помощью инфракрасной фотографии с гиперсенсибилизацией астрофизики смогли получить не только снимки, но и спектрограммы северного сияния, позволяющие судить о его природе. Все это было бы невозможным при обычных приемах астрофотографии в видимых лучах. Главным же преимуществом использования инфракрасной области спектра в астрофотографии является преодоление мешающих съемке потерь излучения в атмосфере (особенно рассеяния), что создает возможность получения четких и ясных изображений и сильно облегчает научные исследования.

В последнее время сделан ряд успешных опытов инфракрасного фотографирования астрономических объектов с помощью электронно-оптических преобразователей.

ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИИ В БОТАНИКЕ И ПАЛЕОНТОЛОГИИ

Зеленый цвет, характерный для листвы растений и трав, объясняется наличием хлорофилла, играющего очень важную роль в жизнедеятельности растений. Кроме хлорофилла, в растениях содержатся и другие пигменты, важнейшими из которых являются каротин и ксантофилл (они характерны желтой окраской). Во многих цветах, фруктах, овощах эти пигменты имеются при полном отсутствии хлорофилла. Когда хлорофилл в листьях и фруктах разрушается светом или другими воздействиями, начинают преобладать желтые пигменты, изменяющие цвет растения или плода из зеленого в желтый или оранжевый.

Когда лучистая энергия падает на листья растений, она частично отражается, частично поглощается веществом листьев (некоторая часть может быть и пропущена насквозь). Вопрос о балансе распределения лучистой энергии в растении сложен и очень интересует биологов и ботаников, позволяя им судить об условиях жизни растений. Особенно интересным является распределение отраженной и поглощенной растением лучистой энергии по спектру. Во всех случаях наблюдается значительный рост коэффициента отражения в крайней красной и инфракрасной областях спектра (это было показано впервые великим русским ученым К. А. Тимирязевым).

Благодаря такому характеру отражения лучистой энергии нетрудно предвидеть, что на инфракрасных фотографиях, сделанных с красным фильтром, срезывающим видимые излучения, зелень должна получаться в общем белой

(как это видно из рис. 33). Различные виды или состояния растений создают на инфракрасных фотографических снимках изображения различной светлоты, что создает возможности для научного анализа.

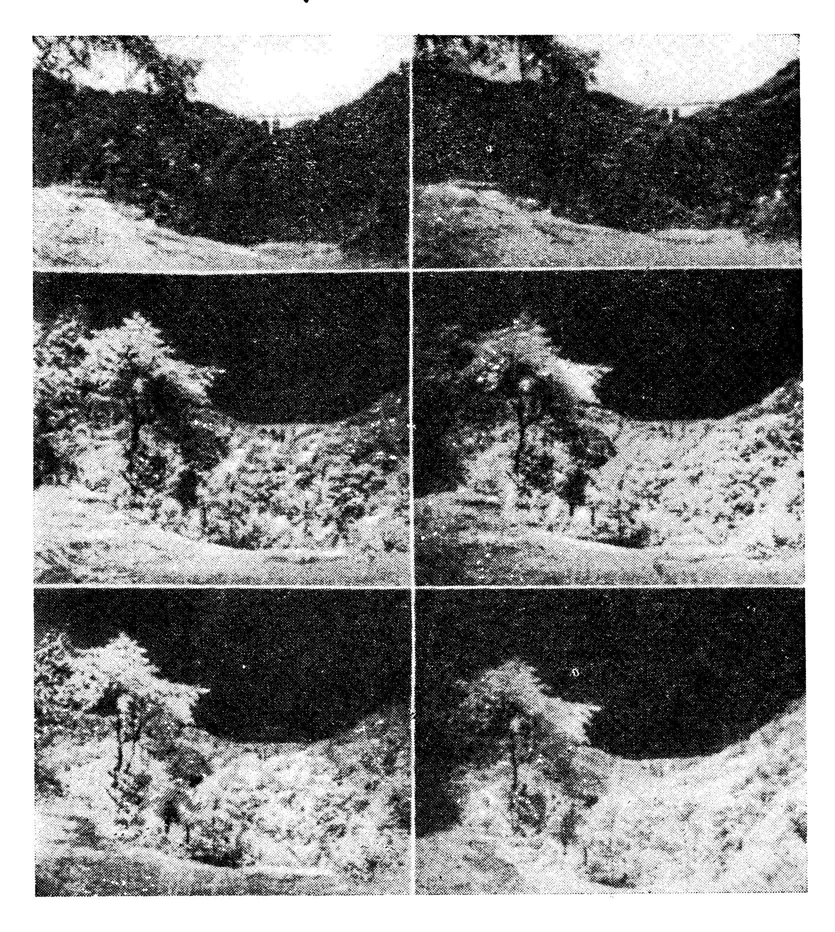


Рис. 33. Фотографии ландшафта, выполненные в различных участках спектра.

Инфракрасная фотография с успехом применяется для экологического исследования (т. е. изучения отношения растений к условиям их существования на данных почвах). Так, установлено, что здоровые травы очень хорошо отра-

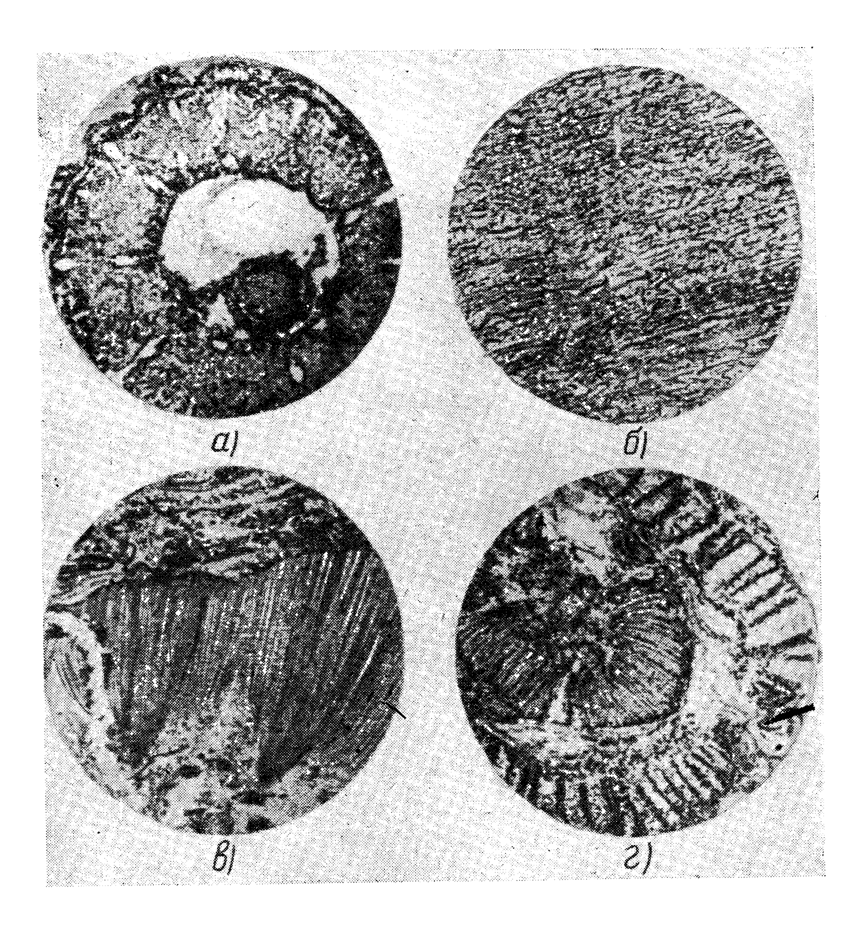


Рис. 34. Инфракрасные микрофотоснимки срезов каменного угля, в которых видны окаменевшие растения.

а — поперечное сечение Lepidodendron Vascu'are; *б* — поперечное сечение Cordaites; *в* — Calamites; *г* — Lyginopteris oldhamia.

жают инфракрасные излучения, тогда как больные травы отражают их плохо. Точно так же молодые растения отражают инфракрасные излучения гораздо лучше, чем зрелые. Все это дает соответствующие изображения на снимках и позволяет вести экологический анализ.

На этом же основывается изучение и диагностика болезней растений, в процессе которых обычно изменяется пигментация клеточного материала, в частности возникает разрушение хлорофилла вредителями или высыхание,

вследствие чего на инфракрасном фотоснимке пораженные участки отчетливо видны как более темные на светлом фоне. На обычных фотографиях пораженные участки не обнаруживаются.

Практическое применение этот же принцип находит в исследовании лесных массивов с помощью аэрофотосъемки: смешанный лес, сфотографированный на обычных материалах, выглядит однообразно темным, тогда как на инфракрасной фотографии резко различаются различные породы деревьев, и на основании этого можно рисовать карты распределения пород деревьев.

Весьма успешно в ботанических исследованиях используется микрофотография в инфракрасных излучениях.

Известно, что древесина различных пород в той или иной мере пропускает инфракрасные излучения. Исследования в этой области помогли научно обосновать способы инфракрасной сушки древесины, о чем будет сказано ниже.

Очень интересным является применение инфракрасной фотографии в палеонтологии и палеоботанике при исследованиях окаменевших насекомых и растений в кусках угля, минералах и т. д. Среда, в которой заключены объекты исследования, чаще всего не прозрачна для видимых лучей, почему обычные фотографические снимки не дают никаких результатов, тогда как на инфракрасных снимках отчетливо видны мельчайшие подробности. Пример таких инфракрасных фотографий показан на рис. 34.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В БИОЛОГИИ, ФИЗИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Так как инфракрасные излучения не обладают способностью химического воздействия на вещества, то эффект, вызываемый ими в живых тканях, является, в основном тепловым: проникая в ткани на ту или иную глубину излучения, поглощаясь, вызывают их нагревание. Установлено, что умеренное облучение тканей коротковолновыми инфракрасными лучами, проникающими в клетки, усиливает их активность, что объясняет последующие биологические и физиологические явления.

В физиологии человека играют важную роль инфракрасные излучения, получаемые от солнца сквозь слой атмосферы. Одним из проявлений воздействия инфракрасных излучений на человеческий организм является реакция кожи, которая является прозрачной для излучений с длиной волны до 1,5 *мк*. Для излучений с длиной волны

более 5 *мк* кожа человека совершенно не прозрачна. Поэтому при терапевтическом воздействии инфракрасных лучей на кожные покровы используют длинноволновые излучения (от нагревательных сопротивлений), а при воздействии вглубь, например на лимфатическую систему, используют излучения с длиной волны 0,76—1,5 *мк* (от ламп накаливания или дуговых ламп). Инфракрасные излучения усиливают кровоток в подсочковых слоях кожи, увеличивают обмен между кровью и тканями, ускоряют выделение токсинов и вызывают образование пигментов, играющих в организме защитную роль. Проникающие инфракрасные излучения через посредство реакций крови и нервной системы воздействуют на функции желез и общий обмен веществ. В связи с этим инфракрасное облучение успешно применяется для лечения заболеваний лимфатической системы, суставных заболеваний, невралгии, миальгии, фурункулов, абсцессов, экзем и накожных сыпей, а также при разнообразных травматических повреждениях.

Для терапевтического применения инфракрасных излучений разработаны и используются многочисленные медицинские аппараты с нагревательными элементами или специальными лампами накаливания, причем облучение определенным образом дозируется.

С успехом используется в некоторых случаях медицинской диагностики инфракрасная фотография. Так, например, с ее помощью прекрасно выявляется венозная система, что позволяет установить соотношения между варикозным расширением вен и поверхностными язвами, что невозможно сделать при использовании обычной фотографии.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИИ В КРИМИНОЛОГИИ, ПРИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДОКУМЕНТОВ

При криминологических исследованиях инфракрасная фотография дает возможность обнаруживать татуировку, уничтоженную на поверхности, но неизгладимую в глубине; таким же методом удается выявлять пятна крови на темных материях, исследовать ожоги от выстрелов и т. д.

При археологических исследованиях инфракрасная фотография помогает изучению древней живописи: оказалось, например, что некоторые древнеегипетские красящие пигменты (например, желтая и красная охра, лазурит и др.) прозрачны для инфракрасных лучей, что позволяет изучать

структуру и подробности древней настенной живописи. Подобные же свойства инфракрасной фотографии используются в музеологии для исследования старых картин, позволяя выявлять их подлинность или скрытую под потемневшими слоями лака первоначальную живопись. Так, например, таким способом были выявлены пигменты, которые никогда не использовались Веласкесом в картине, которая приписывалась этому художнику.

Инфракрасная фотография применяется также при изучении и восстановлении стертых и зачеркнутых документов: в том случае, если чернила, использованные для зачеркивания текста, оказываются прозрачными для инфракрасных лучей, а состав, которым написан или напечатан текст, не прозрачным—текст становится видимым на снимке. Таким же методом выявляются надписи, сделанные на заплесневелой или обожженной бумаге.

Перечисленные применения инфракрасных излучений для научных целей отнюдь не исчерпывают всех возможностей этих применений, описанных в обширной литературе.

ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ СУШКИ

Сушка различного рода материалов и изделий с помощью инфракрасных излучений в последнее время получила значительное распространение и у нас, и за рубежом.

Процессы нагревания материалов с помощью инфракрасных излучений имеют целью в некоторых случаях удаление воды или иных жидкостей, а в других случаях—более сложные процессы, например полимеризацию или конденсацию. Примерами процессов первого рода могут служить сушка древесины, огнеупоров и т. п., примером процессов второго рода—сушка лаков и красок.

Для ряда материалов соответственно характеру их поглощения наиболее выгодными источниками инфракрасных излучений для сушки являются источники, наиболее интенсивное излучение которых происходит в диапазоне 1—2 *мк* (особенно 1,2—1,6 *мк*). В качестве этих источников излучения применяются либо зеркальные лампы накали-

вания—термоизлучатели марки ЗС, описанные выше, либо излучатели в виде нагревательных спиралей из хромистой стали, применяемых с алюминиевыми отражателями (пример такой спирали показан на рис. 35, рядом с которым даны кривые энергетических освещенностей при разных расстояниях от спирали до облучаемой поверхности). Для сушки других материалов, максимум поглощения которых соответствует примерно 3—4 *мк*, применяют инфракрасные

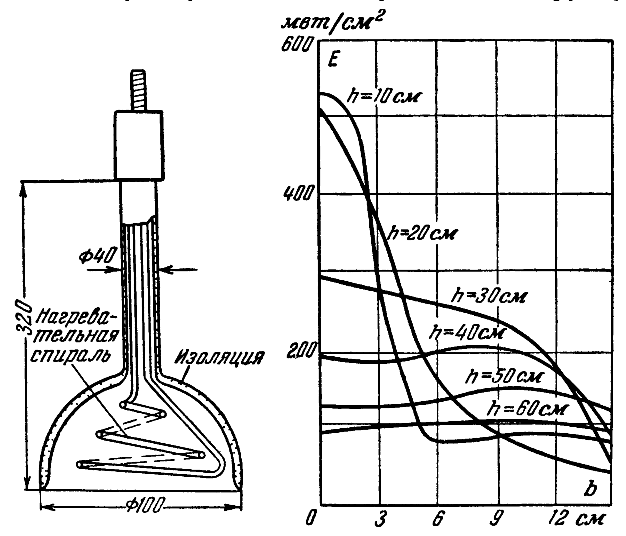


Рис. 35. Нагревательная спираль из хромистой стали с алюминиевым отражателем.

Справа — распределение энергетической освещенности *E* от этой спирали при различных высотах над облучаемой поверхностью

излучатели с газовыми горелками, с использованием тепла отходящих дымовых газов и т. д. (так называемые «темные» излучатели), не рассматриваемые здесь вовсе.

В зависимости от рода инфракрасных излучателей и способов их применения, сушилки для обработки материалов инфракрасными излучениями бывают очень разнообразны по своей конструкции, оформлению и размерам. Некоторые из них действуют непрерывно (например, конвейерные сушилки), другие—периодически.

Расположение источников излучения в сушилках диктуется режимами сушки и может образовывать определенные чередующиеся комбинации (например, шахматное расположение ламп термоизлучателей с определенным

расстоянием между осями) или целые излучающие панели и полосы. По конструкции инфракрасные сушилки бывают камерные, ленточные, конвейерные, барабанные и т. д. Некоторые примеры сушилок различного вида приводятся ниже.

Основной принцип нагрева и сушки с помощью инфракрасных излучений заключается в переносе этих излучений в глубину обрабатываемого материала, где лучистая энергия превращается в тепловую за счет поглощения, свойственного данному материалу.

Механизм процессов сушки достаточно сложен и определяется в основном формой связи влаги с материалом и режимом сушки. При правильно построенном режиме сушки из материала удаляется влага, связанная с ним только физически (например, влага, адсорбированная на стенках пор в пористом или сыпучем материале). Влага, связанная химически, обычно не должна удаляться, так как это приводит к разрушению материала или к резкому изменению его физико-химических свойств.

Почти во всех случаях инфракрасной сушки испарение происходит в десятки раз более интенсивно, чем при обычных способах сушки посредством конвекции или контактной. Причина этого состоит в том, что в процессе инфракрасной сушки обрабатываемому материалу можно передать в единицу времени гораздо большее количество тепла, чем при других способах сушки. Так, например, при сушке материала с начальной температурой 40° С и начальной влажностью 5%, если эта сушка ведется с помощью нагрстого до 100° С воздуха, материалу передается в час 750 *ккал/м*². При таких же условиях, но при использовании инфракрасных ламп накаливания материалу передается в час до 22 500 *ккал/м*² (т. е. в 30 раз больше тепла). В ряде случаев эффект бывает еще значительнее.

Очень важно помнить, что при сушке инфракрасными лучами в сушилках периодического действия и при малых скоростях движения обрабатываемого материала очень большое значение имеет равномерность облучения, так как в противном случае возникают местные перегревы, образование корки, не пропускающей лучистую энергию внутрь материала, пузыри на лакокрасочных покрытиях, растрескивание материала и т. д.

Для успешности процесса инфракрасной сушки решающее значение имеет проницаемость обрабатываемого материала для инфракрасных излучений. Металлы почти

вовсе не прозрачны для инфракрасных излучений (инфракрасные лучи проникают в глубину не более, чем на 1/400 длины волны) — дальнейший прогрев металлов происходит только за счет теплопроводности. В пористые тела (кирпич, огнеупоры, сыпучие тела и т. п.) инфракрасные лучи, наоборот, проникают на ощутимую глубину. Лакокрасочные покрытия при правильном режиме сушки (исключающем образование непрозрачной корки на поверхности) пропускают инфракрасные излучения хорошо, благодаря чему металл, на который нанесено покрытие, нагревается быстрее и отдает ему свое тепло; при этом лакокрасочный слой высыхает быстрее и равномернее.

Характер проникновения инфракрасных излучений в материалы определяет способ сушки, например оптимальную толщину слоя материала в сушилке, обеспечивающую качественную сушку.

Влажные материалы почти всегда обладают меньшей проницаемостью, чем сухие, так что по мере хода сушки проницаемость материалов изменяется.

Приведем некоторые примеры использования инфракрасных излучений для сушки различных материалов.

Удаление воды с помощью воздействия инфракрасных излучений с успехом используется при обработке самых различных материалов, как неорганических (например, при сушке глины, керамики, химических продуктов, активированного угля, минеральных красящих пигментов, абразивов, кремнезема и т. п.) так и органических (например, при сушке зерна, фуража, фруктов и овощей, древесины, тканей, кожи, казеина и т. п.).

Очень тщательно должна выдерживаться технология инфракрасной сушки при обработке некоторых химических продуктов, которые не должны при этом расплавляться. Так, например, при обезвоживании гипосульфита натрия он должен нагреваться не свыше 40° С, что достигается при облучении слоя толщиною ~1 *см* лампами ЗС мощностью 250 *вт* на расстоянии ~40 *см*, причем должно производиться непрерывное перемешивание продукта и аэрация.

При высушивании фуража и зерна режим выбирается таким, чтобы при нагревании не разрушались белки (альбумин и др.) При сушке зерна его температура не должна превышать 45° С (начальная влажность ~ 25% должна быть доведена не более чем до 12%, так как при более высокой влажности зерно плохо сохраняется). Сушка

зерна ведется в туннельных сушилках, в которых слой зерна толщиной 1—2 *см* проходит под лампами-термоизлучателями на расстоянии около 30 *см*. Производительность инфракрасной сушки зерна ясна из того, что ее продолжительность составляет 1,5—2 *ч*, тогда как обычная сушка требует 4—5 *ч*.

Инфракрасная сушка овощей и фруктов позволяет сохранить в них каротин, витамины и хлорофилл, а также целостность клеток. В результате этого при варке продукт сохраняет нормальный объем и вид. Так, благодаря быстроте процесса инфракрасной сушки почти не разрушается витамин С (тогда как при обычной сушке он погибает) и хорошо сохраняются витамины B_1 и B_2.

При инфракрасной сушке древесины производительность зависит от породы дерева, а также от того, подвергается ли сушке свежесрубленное дерево (вода в форме сока, глубоко распределенная в клетках, в этом случае удаляется с трудом) или специально смоченное дерево (например, при пропитке консервирующими составами, красителями и т. п.). В качестве примера можно указать, что при инфракрасной сушке древесины в производстве карандашей создается плотность облучения $\sim$1 *вт/см*^{2}, причем доски проходят на расстоянии 15 *см* под лампами мощностью 250 *вт*. При этом за 15—20 *мин* влажность доводится до 10%.

В текстильной промышленности инфракрасная сушка с успехом применяется после окраски, беления, аппретирования тканей и в других процессах.

При удалении растворителей из лаков и красок в процессе их инфракрасной сушки создаются условия, более благоприятные, чем при сушке теплым воздухом или под вакуумом. Так, например, при инфракрасной сушке пропитки электрической изоляции трансформаторов, кабелей, катушек и т. п. пропитывающие вещества делают изоляцию более прозрачной для инфракрасных лучей. В результате бумага, пропитанная маслом в два слоя, высыхает под инфракрасными лампами на расстоянии 20 *см* от них (средняя плотность облучения 0,7 *вт/см*^{2}) за 4 *ч*, а при сушке теплым воздухом при 60—70° С более чем за 12 *ч*.

При инфракрасной сушке синтетических лаков и эмалей происходит убыстренная полимеризация основы лаков. При этом можно легко избежать высокой температуры, разрушающей основу лака.

Таблица 7

Промышленные установки с инфракрасными лампами накаливания

Обработка	Обрабатываемые изделия	Расстояния между осями ламп, *см*	Внешние размеры установки, *м*			Установленная мощность, *квт*	Продолжительность обработки, *мин*
			Длина	Ширина	Высота		
Сушка лаков	Изоляционные доски	17,5	3	1,5	0,7	46	7
	Мебель из стальных трубок	20	1,4	2,1	2,1	27	10
	То же	18	1,3	1,9	1,8	27	8
	Велосипедные багажники	22	2	1,2	1,2	14	6
	Несгораемые шкафы (сейфы)	15	2,2	2,2	1,7	35	15
	Части корпуса часов	21	3	1,2	2	33	4
	То же	16	0,6	1,2	0,8	3,5	20
	Покрытия инструментов	20	7	0,5	—	20	7
	Холодильники	23	—	—	—	30	12
	Кузова автомобилей	40	6	5,1	2,5	46	5
Сушка	Проклеенные конверты для писем	16	4	1	1	13	0,8
	Видовые открытки	18	5	1	—	14	1,5
	Спиртовой лак на плакатах	50	6	1,5	0,5	7	0,5
	Голубая калька	13	0,8	1	0,5	6,3	0,8
	Глянцевая бумага для плоской печати	20	1	0,6	0,4	2	
	Проклеенные подошвы обуви	15—35	1,5	1,5	2	2,3—9	5—20
Предварительная сушка	Набивные ткани	15	0,7	1,5	—	11,3	0,75
Обугливание ворса	Ворсистая ткань	30	—	1,8	1	3,8	40
Нагревание	Жесткая бумага	17	1,6	0,4	0,6	2,3	0,25

Бакелитовые лаки запекаются при относительно высокой температуре (150—160° С) и введение в эти лаки пигментов способствует превращению излучений в тепло в глубине лаковой пленки. Для такой сушки под лампами 250 *вт* требуется расстояние 15—30 *см* и примерно такое же расстояние между осями ламп.

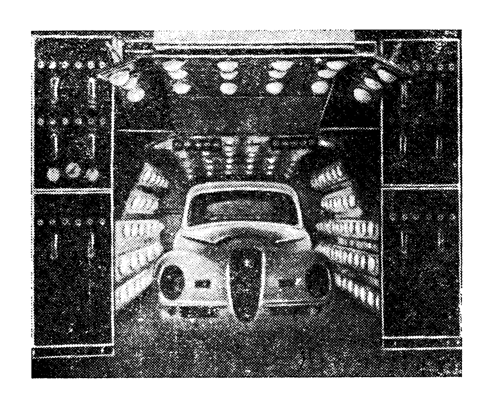


Рис. 36. Печь для инфракрасной сушки лаков на кузовах автомобилей.

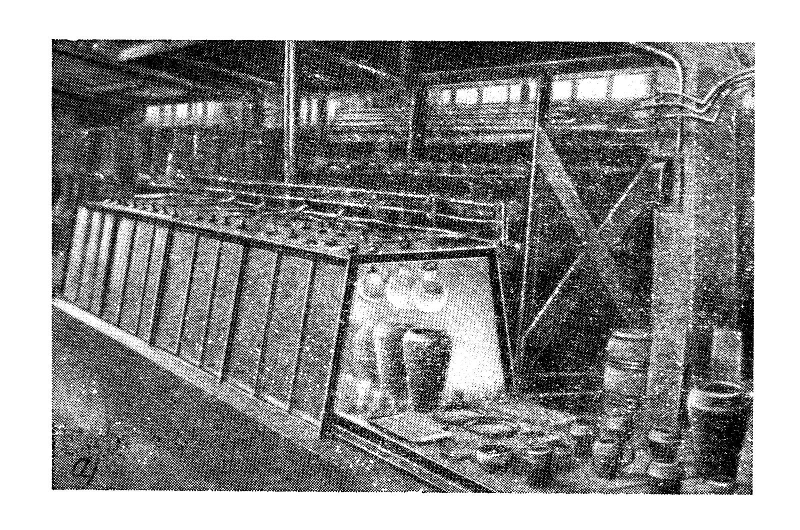
Установлено 194 инфракрасных ламп (по 250 *вт*); длина печи 6, ширина 3, высота 2,3 *м*.

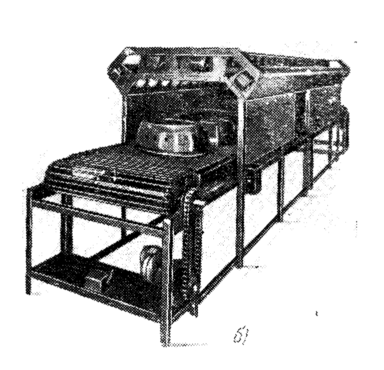
Особенно хорошие результаты дает инфракрасная сушка эфиро-целлюлозных лаков: продолжительность сушки в туннельных печах при установке ламп мощностью 250 *вт* на расстоянии 20 *см* между осями ламп и около 30 *см* до окрашенных изделий составляет только 3—4 *мин* при отличном качестве высохшей пленки.

В табл. 7 приводятся некоторые данные промышленных установок для инфракрасной сушки, а на рис. 36 и 37 — некоторые примеры подобных установок.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИИ В ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Применение инфракрасных излучений при контроле тканей дает возможность выявлять малозаметный брак и неравномерности тканей, контролировать однородность их окраски, выбирать наиболее выгодные красители для темных тканей, используемых при пошиве летней одежды





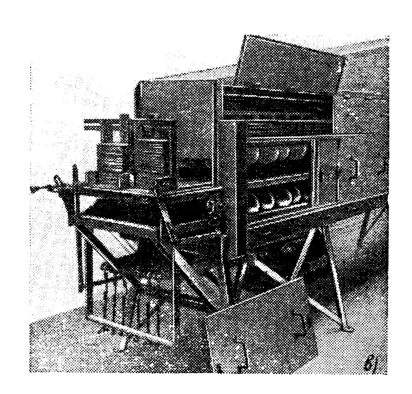


Рис. 37. Типы конвейерных инфракрасных сушилок.

а — туннельная печь для инфракрасной сушки керамических изделий (установлено 40 инфракрасных ламп по 250 *вт*, достигается полное высушивание керамических сосулов с начальным содержанием влаги 50% в течение 45 мин); *б* — печь с металлическим транспортером для инфракрасной сушки краски на металлических изделиях (установлено 152 инфракрасных ламп по 250 *вт*, длина печи 6 *м*); *в*—печь для сушки небольших деревянных изделий с инфракрасными лампами по 250 *вт*.

и т. д. Этот метод основан на том, что многие красители для тканей, одинаково отражающие в видимой области спектра, резко различаются по своим отражательным свойствам в ближней инфракрасной области спектра. Благодаря этому образцы тканей, хорошо отражающих коротковолновые инфракрасные излучения, получаются на фо-

тографиях, сделанных в этих лучах, светлыми, и именно эти ткани пригодны для летней одежды.

Помимо влияния природы красителя, на характер отражения инфракрасных лучей влияет отделка и способ обработки ткани (способ окраски, протрава и т. д.). Инфракрасные фотографии трикотажа, кажущегося равномерным по оттенку, позволяют выявить не одинаковые по прочности материалы, использованные для его изготовления. Это особенно важно, когда две партии пряжи, окрашенные в одинаковый цвет, но различными красителями, смешиваются для использования в производстве одного и того же изделия.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ПТИЦЕВОДСТВЕ И ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Живые существа подвергаются воздействию совокупности излучений, удовлетворяющих важные жизненные потребности. Изменение в балансе этих излучений может принести в некоторых случаях вред, однако в других случаях увеличение определенных излучений прекрасно стимулирует рост и жизнедеятельность животных, если этот процесс специально изучается и регулируется.

Прекрасные результаты дает инфракрасное облучение, примененное в птицеводстве. При облучении цыплят инфракрасными лампами они поглощают значительно больше корма и быстро увеличивают свой вес, в заметно большей мере, чем необлучаемые. При этом заметно повышается невосприимчивость молодняка к различным заболеваниям. За границей, например в США и Франции, инфракрасное облучение широко используется на крупных птицеводческих фермах, на которых в таких условиях выращиваются сотни миллионов цыплят. Отмечено, что в таких условиях облучения индюшат, продолжающегося до 12 недель, птицы выращиваются быстрее, весят больше и в гораздо меньшем количестве погибают.

Столь же успешны опыты применения инфракрасного облучения при выращивании молодняка в животноводстве (поросят, ягнят, телят и т. д.).

ВОЕННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В период второй мировой войны инфракрасные излучения нашли широкое применение в военной технике. Этим применениям посвящена обширная литература. В после-

военный период и в настоящее время, судя по статьям, помещаемым в зарубежной печати, продолжается напряженная работа в области военных применений техники инфракрасных лучей в вооруженных силах различных стран (в первую очередь, в США, Англии, Франции и ФРГ).

Основные преимущества использования инфракрасных излучений в военных целях состоят:

1) в невидимости инфракрасных лучей, позволяющей осуществлять маскировку от зрительного наблюдения;

2) в меньших, по сравнению с видимыми излучениями, потерях инфракрасных излучений определенных длин волн при прохождении сквозь толщу атмосферы, даже в условиях дымки и слабого тумана (но не густого, плотного тумана);

3) в простоте генерирования инфракрасных излучений в тех случаях, когда требуется активная посылка их в направлении удаленных объектов; в этих случаях с успехом используются многие разновидности источников света (электрические лампы накаливания и дуги, газоразрядные лампы и т. д.), закрытые специальными фильтрами.

Наиболее важными военными применениями инфракрасных излучений являются: 1) теплопеленгация (обнаружение удаленных объектов по их тепловому излучению); 2) самонаведение управляемых реактивных снарядов; 3) использование приборов ночного видения, основанных на применении электронно-оптических преобразователей; 4) связь на инфракрасных лучах; 5) оптическая блокировка на инфракрасных лучах; 6) демаскировка камуфляжа при помощи инфракрасных лучей; 7) инфракрасная фотография.

ТЕПЛОПЕЛЕНГАЦИЯ

Теплопеленгация представляет собой способ обнаружения и определения направления на нагретые тела (корабли, самолеты, танки и т. д.) по их тепловому излучению. При движении этих объектов находящиеся на них машины и двигатели выделяют теплоту и повышают температуру наружных поверхностей. Обнаружение таких объектов тем легче, чем сильнее они нагреты. Теплопеленгация состоит в обнаружении контраста излучений цели и фона, на котором она наблюдается. Поэтому вполне возможна теплопеленгация целей более холодных, чем фон (например, плавающих айсбергов). В противоположность радиолокационным установкам теплопеленгаторы не посылают

во время работы никакой энергии к объекту наблюдения, а действуют на пассивном принципе, получая излучения от цели и от фона и реагируя на контраст этих излучений.

Теплопеленгаторы используются главным образом ночью, когда нет мешающего действия дневного излучения солнца, неба и окружающих фонов. Дальность действия теплопеленгаторов заметно зависит от метеорологических условий, влияющих на потери энергии в слое атмосферы, отделяющем цель от прибора.

Современные теплопеленгаторы в зависимости от того, где они устанавливаются и какие задачи выполняют, могут быть корабельными, береговыми, зенитными и самолетными. Почти все теплопеленгаторные станции работают автоматически: осматривая определенную часть пространства, они обнаруживают цель, если она появилась в поле зрения прибора.

Приемником инфракрасных излучений в теплопеленгаторе может служить термоэлемент, болометр или фотосопротивление. Вид приемника выбирается в зависимости от характера ожидаемого спектрального распределения излучения цели. Так, например, корабли имеют поверхности как нагретые до температуры, мало отличающейся от температуры окружающей среды, так и нагретые значительно сильнее — до 100° С и более (поверхности труб и газовый факел). В общем при теплопеленгации используются участки инфракрасного спектра приблизительно до 12 *мк*.

Назначение теплопеленгаторной станции (комплекса приборов, осуществляющих теплопеленгацию) состоит в обнаружении цели в заданном секторе наблюдения и указании пеленга на нее. Для выполнения этих функций теплопеленгаторная станция состоит из следующих основных частей:

1) приемного устройства, содержащего обычно параболический отражатель, в фокусе которого расположен приемник излучений;

2) усилительного устройства, усиливающего сигнал, полученный приемником, до величины, позволяющей приводить в действие автоматику станции;

3) приборов автоматики и электрического привода, приводящих приемное устройство во вращение, осуществляющих реверс и удержание цели на оптической оси приемного устройства;

4) индикаторного устройства, показывающего наличие цели и ее пеленг.

Примером теплопеленгаторной станции может служить немецкий теплопеленгатор «Донау-60», общий вид которого показан на рис. 38. Приемное устройство имеет параболическое зеркало диаметром 60 *см*, в фокусе которого расположен болометр; падающее излучение модулируется небольшим вращающимся диском с отверстиями, располо-

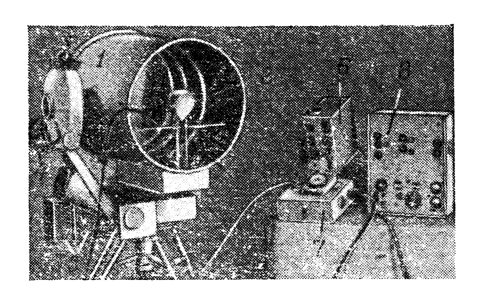


Рис. 38. Общий вид немецкого теплопеленгатора „Донау-60".

1 — барабан приемного устройства с зеркалом; *2* — болометр; *3* — визир; *4* — ручной привод для наводки по углу места; *5* — датчик пеленга; *6* — индикаторное устройство; *7* — регулятор скорости поиска; *8* — пульт управления с усилителем

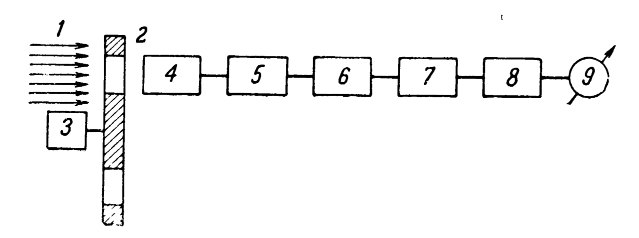


Рис. 39. Блок-схема немецкого теплопеленгатора „Донау-60".

1 — падающий поток излучения; *2* — модулирующий диск; *3* — электродвигатель диска; *4* — болометр, *5* — первый усилитель; *6* — первый выпрямитель; *7* — второй усилитель; *8* — второй выпрямитель; *9* — индикаторное устройство.

женными перед приемными площадками болометра; частота модуляции — 12 *гц*. Чувствительные элементы болометра изготовлены из пластинок сурьмы толщиной ~0,07 *мм* и помещены в стеклянный баллон, в котором создан вакуум. Окном баллона служит пластинка из KRS-5. Болометрический мост питается переменным током при частоте 4 000 *гц*. Световой индикатор пишет светящуюся линию на

фосфоресцирующем барабане; в момент появления цели происходит выброс световой линии. Теплопеленгатор «Донау-60» пеленгует корабли на расстоянии до 35 *км*.

На рис. 39 показана блок-схема этого теплопеленгатора. При получении сигнала на выходе болометрического моста появляется переменное напряжение с частотой питания моста (4 000 *гц*), модулированное частотой, с которой диск перекрывает световой поток (12 *гц*). Напряжение с выходного моста усиливается сначала первым усилителем на частоте питания моста (4 000 *гц*), затем выпрямляется и вновь усиливается вторым усилителем на частоте модуляции потока излучения (12 *гц*). После этого производится вторичное выпрямление и полученное постоянное напряжение подается в индикаторное устройство.

ИНФРАКРАСНЫЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ

Эти системы наведения управляемых снарядов в настоящее время являются серьезным конкурентом радиолокационных систем наведения в силу того, что они легче, меньше по габаритам, значительно менее сложны и менее дороги, чем радиолокационные системы с равными возможностями.

По данным зарубежной печати инфракрасные системы наведения в настоящее время достигли очень большой точности действия, что вместе с их высокой помехоустойчивостью открывает возможность применения этих систем в ряде случаев и, в частности, в снарядах класса «земля-воздух» для борьбы против межконтинентальных баллистических ракет и высотных ракет, выхлопные газы которых являются отличным инфракрасным излучателем.

Принцип действия инфракрасных систем наведения заключается в приеме сигнала от инфракрасного излучения цели с помощью сканирующей оптической приемной системы, воздействующей на сервомоторы, управляющие рулями. На рис. 40 показана схема одной из таких систем, опубликованная в американской печати.

Эта система действует следующим образом. Еще на стартовой установке по данным, полученным от теплопеленгатора или радиолокационной станции, зеркало инфракрасной головки самонаведения, расположенной в головной части снаряда, наводится на цель и следит за ее перемещением. После старта снаряда зеркало продолжает автоматически следить за целью. Если цель смещается из равносигнальной зоны, образованной двумя одинаковыми

приемниками излучений (фотосопротивлениями), то на выходе демодулятора появляется электрический сигнал рассогласования, который с помощью силового привода заставит головку повернуться на цель. На зеркале головки расположены гиродатчики, которые вырабатывают при этом сигналы, подаваемые в каналы управления, вследствие чего рули ракеты поворачивают ее в сторону цели. Таким

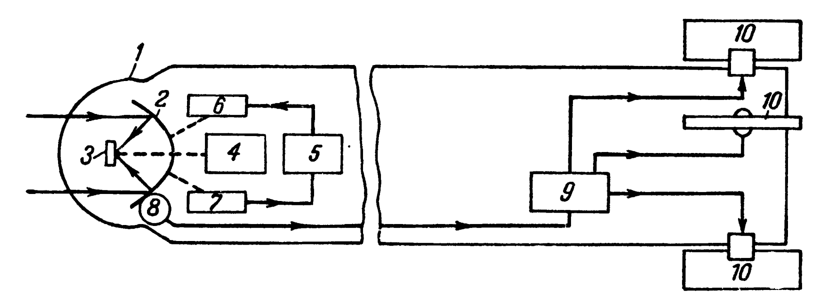


Рис. 40. Схема устройства одной из американских систем самонаведения по инфракрасному излучению цели.

1 — обтекатель; *2* — зеркало; *3* — приемник излучений; *4* — усилитель; *5* — демодулятор; *6—7* — силовые приводы головки; *8* — гидродатчик; *9* — канал управления рулями; *10* — рули.

образом, ракета автоматически осуществляет погоню за целью и все время наводится на нее вплоть до точки встречи. По данным американской печати инфракрасные головки самонаведения обладают дальностью действия по воздушным целям до 15—18 *км*.

Инфракрасные системы могут обнаруживать в дневное время излучение некоторых звезд, что позволяет использовать их в астронавигационных автоматических системах для пилотирования крылатых снарядов.

ПРИБОРЫ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Эти приборы, основанные на использовании инфракрасных излучений и электронно-оптических преобразователей, нашли в настоящее время широкое распространение. Основой комплекта аппаратуры для ночного наблюдения в инфракрасных лучах является электронно-оптический наблюдательный прибор (рис. 41), состоящий из объектива *1*, создающего изображение наблюдаемого объекта в инфракрасных лучах на фотокатоде электронно-оптического преобразователя *2*. После превращения этого изображе-

ния в видимое (на экране ЭОП), наблюдатель рассматривает его через окуляр *3*.

Аппаратура снабжается инфракрасным прожектором — светооптической системой с источником излучения, прикрытым инфракрасным фильтром, не пропускающим видимых излучений. В комплект аппаратуры входит блок

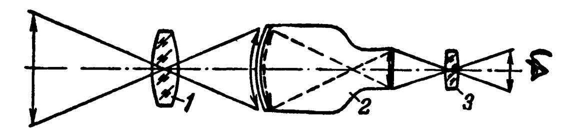


Рис. 41. Схема электронно-оптического прибора для ночного видения.

1 — объектив; *2* — электронно-оптический преобразователь; *3* — окуляр;

питания для ЭОП, преобразующий постоянный ток низкого напряжения (5—10 *в*) в постоянный ток высокого напряжения (до 20 *кв*), и источник питания инфракрасного прожектора. Спектральная область излучения прожектора должна соответствовать распределению спектральной чувствительности ЭОП (0,8—1,2 *мк*).



Рис. 42. Автомат с ночным прицелом.

1 — электронно-оптический телескоп; *2* — инфракрасный прожектор; *3* — автомат; *4* — источник питания для прожектора и ЭОП.

В качестве примера таких приборов можно привести описанные в иностранной печати, ночной прицел для автомата, показанный на рис. 42 (обеспечивает ведение прицельного огня в темноте на расстояние до 70 *м*), и нашлемный инфракрасный бинокль, показанный на рис. 43.

Бинокль образован двумя электронно-оптическими телескопами с перископичностью до 100 *мм*. Блок питания является одновременно противовесом системы на задней части шлема. Дальность действия бинокля зависит от силы света инфракрасного прожектора, который необходим для использования этой системы.

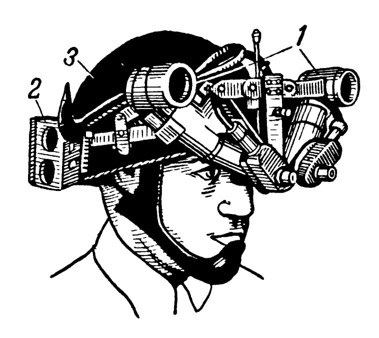


Рис. 43. Нашлемный инфракрасный бинокль.

1 — электронно-оптические перископические телескопы; *2* — источник питания для ЭОП; *3* — шлем

СВЯЗЬ И БЛОКИРОВКА

Связь и блокировка на инфракрасных излучениях основаны на совместном использовании источника инфракрасных излучений и оптической системы, создающей узкий направленный и модулированный луч, и приемника излучений (фотоэлемента или фотоэлектронного умножителя), демодулирующего устройства, усилителя и исполнительной аппаратуры (автоматики, приводящей в действие сигнальные приборы, телефона и т. п.).

В настоящее время перспективы использования таких систем увеличиваются в связи с возможностью применения в них цезиевых и ксеноновых газоразрядных ламп с очень высокой яркостью в ближней инфракрасной области спектра (0,8—0,9 *мк*), соответствующей максимуму чувствительности современных фотокатодов. Большое преимущество этих источников излучения заключается в простоте модулирования со звуковой частотой посредством изменения тока через лампу.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИИ ДЛЯ ВОЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

Инфракрасная фотография для военных целей применяется на основе принципов, изложенных выше и позволяющих вести съемку через значительную толщу атмосферы, а также различать на снимках объекты, обладающие различной отражательной способностью в инфракрасной области спектра. Это дает возможность при использовании специальной длиннофокусной фотоаппаратуры (с фокусным расстоянием в несколько метров) решать ряд военных задач—инженерную и артиллерийскую разведку, фотографическую демаскировку, корректировку огня дальнобойной артиллерии и т. д.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

Судя по сообщениям иностранной технической печати, в настоящее время ведется разработка активных систем, действующих по схеме оптической локации, сходной с действием радиолокации, и основанных на посылке кратковременных импульсов инфракрасного излучения, отражающихся от цели и возвращающихся к посылающей аппаратуре. Такая схема дает возможность определения расстояния до цели.

Без сомнения перспективны и тенденции сочетания возможностей техники инфракрасных лучей и радиолокации. Так, например, при установке на снарядах классов «земля-воздух» и «воздух-воздух» сочетания пассивной радиолокационной системы и инфракрасной системы самонаведения, первая из этих систем может быть использована для наведения на цель, если последняя излучает радиоволны от аппаратуры для создания помех[1]. Если же такого излучения от цели нет, то для наведения используется инфракрасная пассивная система.

Весьма перспективны и работы по усовершенствованию приемников инфракрасного излучения, особенно фотосопротивлений с более далекой границей спектральной чувствительности: в иностранной печати имеются уже статьи

[1] В этом случае радиолокационная система не посылает своих импульсов, а только воспринимает импульсы, посылаемые целью, т. е. действует как пассивная система.

об исследовании сопротивлений из сурьмянистого индия с границей чувствительности ~ 8 *мк* и, разумеется, это далеко не окончательные возможности в области полупроводниковых фотосопротивлений. В такой же мере интересны перспективы создания безвакуумных электронно-оптических преобразователей, основанных на явлениях электролюминесценции и также позволяющих продвинуться далее в инфракрасную область спектра по сравнению с современными электронно-оптическими преобразователями.

Цена 1 р. 85 к.